

Bauhaus-Universität Weimar
Fakultät Bauingenieurwesen
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde

Masterarbeit

Konfektionierung eines Calciumsulfat-Bindemittelsystems zur
Herstellung volumenstabiler Fließestrichmörtel

Bearbeiter:	Vivienne Piethe
Matr.-Nr.:	117012
Studiengang:	Baustoffingenieurwissenschaft
Erstprüfer:	Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig
Betreuer und Zweitprüfer:	Dr.- Ing. Saskia Nowak
Beginn der Arbeit:	09.04.18
Einzureichen am:	09.09.18

Aufgabenstellung

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis	9
1. Einleitung.....	11
2. Literaturrecherche.....	12
2.1. Das Calciumsulfatsystem.....	12
2.1.1. Rohstoffe und technische Calciumsulfate	13
2.1.2. Hydratation/ Abbinden	14
2.2. Calciumsulfatfließestriche	15
2.2.1. Materialien	17
2.2.2. Anforderungen.....	20
2.2.3. Mechanische Eigenschaften	21
2.2.4. Trocknungs- und Formänderungsverhalten	22
2.3. Möglichkeiten und Herausforderungen für die Gipsindustrie	24
2.3.1. Aktuelle Situation: Alternative zu REA-Gips	24
2.3.2. Gipsrecycling	26
3. Experimentelle Untersuchungen	28
3.1. Materialien	28
3.2. Charakterisierung der Bindemittel.....	30
3.2.1. Spezifische Oberfläche.....	31
3.2.2. Chemische Analyse	31
3.2.3. Phasenanalyse mittels XRD	32
3.3. Voruntersuchungen der Mörtel.....	33
3.3.1. Ermitteln der W/B-Werte mittels Fließmaßversuch.....	35
3.3.2. Ermitteln des Erstarrungsbeginns mittels Vicat-Versuch	37
3.3.3. Ermitteln der Fließmitteldosierungen zum Erhalt eines einheitlichen W/B-	

Werts von 0,47 mittels Fließmaßversuch	41
3.4. Hauptuntersuchungen.....	42
3.4.1. Längenänderungsmessung mittels Schwindrinne	43
3.4.2. Hydratationsverhalten	60
3.4.3. pH-Wert Ermittlung	74
3.4.4. Ermitteln mechanischer Eigenschaften	75
4. Zusammenfassung	91
5. Literaturverzeichnis.....	97
6. Anhang	101
Anhang 1 – Probenbezeichnung.....	101
Anhang 2 – Ergebnisse Untersuchungen der Sande	103

Abkürzungsverzeichnis

HH	Calciumsulfat-Halbhydrat
A II	Anhydrit II
DH	Calciumsulfat-Dihydrat
CA	Calciumsulfatestrich
CAF	Calciumsulfatfließestrich
BM	Bindemittel
GK	Gesteinskörnung
W/B-Wert	Wasser/Bindemittel-Wert
NA	Naturanhydrit
SA	Synthetischer Anhydrit
TA	Thermoanhydrit
HG	Hydratationsgrad
VZ	Verzögerer
FM	Fließmittel
PCE	Polycarboxylatether-Fließmittel
RC-Gips	Recycling-Gips
XRD	X-Ray Diffraction
ESEM	Environmental Scanning Electron Microscope

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hydratationsgrade der Calciumsulfatbinder [9, 13]	17
Tabelle 2: Festigkeitsklassen nach DIN EN 13813 [3].....	22
Tabelle 3: Zulässige Restfeuchte nach DIN 18365 [1, 26, 30].....	23
Tabelle 4: Bezeichnung und Komponenten der Bindemittelmischungen	28
Tabelle 5: Bezeichnung und Eigenfeuchten der Sande.....	28
Tabelle 6: Arten der Zusatzmittel und -stoffe	30
Tabelle 7: Spezifische Oberflächen der Bindemittelkomponenten nach BET	31
Tabelle 8: Ergebnisse der Chemischen Analyse der Bindemittelkomponenten	32
Tabelle 9: Quantitative Phasenanalyse der Bindemittelkomponenten mittels XRD; n.b.= nicht bestimmbar	32
Tabelle 10: Dosierung Zusatzmittel Fließmaßversuch Reihe 1, Fließmaß 240 mm \pm 10	35
Tabelle 11: Ergebnisse Fließmaßversuch Reihe 1, Fließmaß 240 mm \pm 10.....	35
Tabelle 12: Dosierung Zusatzmittel Fließmaßversuch Reihe 2, Fließmaß 240 mm \pm 10	36
Tabelle 13: Ergebnisse Fließmaßversuch Reihe 2, Fließmaß 240 mm \pm 10	36
Tabelle 14: Ergebnisse Erstarrungsbeginn-Untersuchung mittels Vicat-Versuch	39
Tabelle 15: Ergebnisse Dosierungen Zusatzmittel Fließmaßversuch Reihe 4, Fließmaß 240 mm \pm 10, W/B-Wert 0,47	41
Tabelle 16: Messreihen der Längenänderungsmessungen in der Schwindrinne	45
Tabelle 17: Hydratationsgrad der Mörtelprismen, Alter 7 d.....	71
Tabelle 18: pH-Werte der Mörtelproben	74
Tabelle 19: Druckfestigkeiten in [N/mm ²] und Standardabweichung [N/mm ²] der entsprechenden Mörtelproben	81
Tabelle 20: Biegezugfestigkeiten in [N/mm ²] und Standardabweichung [N/mm ²] der entsprechenden Mörtelproben.....	81
Tabelle 21: Probenbezeichnung Hauptuntersuchungen.....	101
Tabelle 22: Probenbezeichnung Hauptuntersuchungen Messreihe 2+3.....	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Gipskreislauf.....	12
Abbildung 2: Löslichkeit der Calciumsulfate in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur nach FORERST 1957, FREYER 2000, MÜLLER 2007 [21]	14
Abbildung 3: Sand A +	29
Abbildung 4: Sand B -	29
Abbildung 5: Sand D -	29
Abbildung 6: Versuchsplan Voruntersuchungen	34
Abbildung 7: Hauptuntersuchungen - Vergleich der Bindemittelcompounds mit dem Referenz-/ Standard-compound zur Herstellung eines volumenstabilen Fließestrichs.....	43
Abbildung 8: Längenänderungsmessung mittels Schwindrinne	44
Abbildung 9: Messreihe 1a: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK Normsand; W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm ± 10 mm.....	46
Abbildung 10: Messreihe 1b: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (B-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm ± 10 mm	48
Abbildung 11: Messreihe 1c: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm ± 10 mm	50
Abbildung 12: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Ref mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); Fließmaß 220 mm ± 10 mm; Ergebnisse aus wiss. Kolleg [24].....	52
Abbildung 13: Messreihe 1: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm ± 10 mm.....	53
Abbildung 14: Messreihe 1: Längenänderungsmessung mittels Schwindrinne der Mörtelproben: Compound B mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm ± 10 mm.....	54
Abbildung 15: Messreihe 2: Einfluss Verzögerer: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound A, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm ± 10 mm	55
Abbildung 16: Messreihe 3: Einfluss Fließmittel: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound A, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm ± 10 mm	57
Abbildung 17: Messreihe 4: Einfluss W/B-Wert: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47/0,51	58
Abbildung 18: Kalorimetrie der Compounds Ref, A, B, C; ohne GK; W/B-Wert: 0,47	60
Abbildung 19: Kalorimetrie der Mörtel; Compound Ref, B mit GK (NS), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47	62
Abbildung 20: Kalorimetrie der Mörtel; Compound Ref (mit VZ), Sta (ohne VZ) mit GK (NS), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47	64
Abbildung 21: Ultraschall-Laufzeit-Messung der Mörtelproben: Compound Ref, B, C mit GK (NS),	

(B-), (D-); W/B-Wert: 0,47	66
Abbildung 22: Ultraschall-Laufzeit-Messung der Mörtelproben: Compound Ref (mit VZ), Sta (ohne VZ) mit GK (NS), (B-); W/B-Wert: 0,47	69
Abbildung 23: Quantitative Ergebnisse XRD Mörtelprobe A (B-), Probenalter 7 d	72
Abbildung 24: Quantitative Ergebnisse XRD Mörtelprobe Sta (D-), Probenalter 7d	72
Abbildung 25: Quantitative Ergebnisse XRD Mörtelprobe C (D-), Probenalter 7d	72
Abbildung 26: Quantitative Ergebnisse XRD Mörtelprobe B (NS), Probenalter 7d	72
Abbildung 27: Messreihe 1a: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (NS); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d	76
Abbildung 28: Prismen Probe A (NS), Sta (NS); W/B-Wert 0,47; nach Entschalung	77
Abbildung 29: Prismen Probe B (NS), C (NS); W/B-Wert 0,47; nach Entschalung	77
Abbildung 30: Messreihe 1b: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (B-); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d	78
Abbildung 31: Prismen Probe A (B-), Sta (B-); W/B-Wert 0,47; nach Entschalung	79
Abbildung 32: Prismen Probe B (B-), C (B-); W/B-Wert 0,47; nach Entschalung	79
Abbildung 33: Prismen Probe B (B-) und C (B-); W/B-Wert: 0,47	79
Abbildung 34: Messreihe 1c: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (D-); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d	80
Abbildung 35: Messreihe 1: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; 7d	83
Abbildung 36: Messreihe 1: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound B mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; 7d	83
Abbildung 37: Messreihe 1: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound B, C mit GK (B-); Vergleich Probenalter 7d/21d; W/B-Wert 0,47;	85
Abbildung 38: Messreihe 2: Einfluss Verzögerer: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound A, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d	86
Abbildung 39: Prismen Probe A (B-), B (B-), B (D-) mit 0,05 % Retardan; W/B-Wert 0,47; nach Entschalung; links Prismenoberfläche, rechts entsprechende Seitenfläche	87
Abbildung 40: Messreihe 3: Einfluss Fließmittel: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound A, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d	88
Abbildung 41: Messreihe 4: Einfluss W/B-Wert: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert 0,47/0,51; Prüfalter 7d	89
Abbildung 42: Konzentration der gelösten Aluminiumionen der Sande mittels ICP	103
Abbildung 43: qualitatives XRD Ergebnis der GK B - (Partikelgröße < 63 µm)	104
Abbildung 44: Korngrößenverteil GK A +	105
Abbildung 45: Korngrößenverteilung GK B -	106
Abbildung 46: Korngrößenverteilung GK D -	107

1. Einleitung

Bei einem marktüblichen Calciumsulfat-Fließestrich wurden in der Praxis schädigende Volumenexpansionen festgestellt. Diese sind ein Resultat aus dem Zusammenwirken des eingesetzten Bindemittels und der Gesteinskörnung. Es stehen insgesamt vier Sande zur Verfügung, welche aufgrund der guten Verfügbarkeit im direkten Umfeld am günstigsten für das Unternehmen sind. Frühere Untersuchungen im Rahmen eines wissenschaftlichen Kollegs zeigten, dass nur einer dieser Sande nicht volumenexpansiv ist, wohingegen die anderen drei Sande eine schädigende Ausdehnung des Fließestrichs in Verbindung mit dem marktüblichen Estrichcompound auslösten.

Der Grund für die auftretende Volumenexpansion konnte noch nicht geklärt werden, allerdings konnte eine potentielle Ettringitbildung, durch herausgelöste Aluminiumkomplexe aus den Tonmineralen der Gesteinskörnung als alleinige Ursache ausgeschlossen werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Calciumsulfat-Bindemittelsystem zu konfektionieren, welches in der Lage ist, die im Mörtel festgestellten Volumenexpansionen zu unterbinden. Es sollen verschiedene Bindemittel- und Additivzusammensetzungen untersucht werden, welche in Verbindung mit der kritischen Gesteinskörnung die Herstellung eines volumenstabilen Fließestrichs ermöglichen. Als Referenzmörtel dient der vorgegebene Estrichcompound aus der vorangegangenen wissenschaftlichen Kollegarbeit und ein weiterer Compound, welcher keinen Verzögerer enthält. Dieser wird im Rahmen dieser Arbeit als Standardcompound bezeichnet. Die genaue Additivzusammensetzung beider Compounds ist nicht bekannt.

Es sollen drei Bindemittel-Mischungen, bestehend aus unterschiedlichen Anteilen der Komponenten α -Halbhydrat, Thermoanhydrit und Naturanhydrit, hergestellt werden. Diesen wird eine geeignete Additivzusammensetzung zugesetzt. Bei einer vergleichbaren fließfähigen Konsistenz werden die Mörtel mit den eigens hergestellten Compounds auf das Längen-änderungsverhalten hin untersucht. Dabei werden die jeweiligen Rezepturen variiert, um den Einfluss der einzelnen Komponenten zu analysieren. So wird der Einfluss der Bindemittel, des W/B-Werts und von verschiedenen Verzögerern und Fließmitteln genauer überprüft. Ergänzend dazu werden die Festigkeitswerte der Mörtel ermittelt.

Des Weiteren sind die Ergebnisse der Längenänderungsuntersuchung mit dem Hydratationsprozess und der Gefügeentwicklung in Zusammenhang zu bringen. Die verwendeten Untersuchungsmethoden sollen hinsichtlich ihrer Eignung für zukünftige Qualitätsüberprüfungen im Werkslabor beurteilt werden.

2. Literaturrecherche

2.1. Das Calciumsulfatsystem

Calciumsulfate stellen hinsichtlich ihrer Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse einen in sich geschlossenen Stoffkreislauf dar. Dem Gipsstein (Calciumsulfatdihydrat: $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) kann das Wasser leicht und reversibel durch den Brennprozess ausgetrieben werden, sodass entweder Halbhydrat ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) oder Anhydrit (CaSO_4) entsteht [3, 8]. Dieser Vorgang wird als Dehydratation bezeichnet [3].

Werden diese Produkte mit Wasser angemacht, findet die Rehydratation statt [3]. Dabei geht das Halbhydrat (HH), bzw. das Anhydrit II (A II) mithilfe von Anregern in Lösung. Aus dieser an Calciumsulfatdihydrat (DH) übersättigten Lösung bilden sich DH-Kristalle, welche mit der Zeit wachsen und festigkeitsbildend sind [8, 11, 30]. Eine genaue Beschreibung des Hydratations-verlaufs ist in 2.1.2. zu finden. Somit besteht sowohl einer der Rohstoffe als auch das verfestigte Endprodukt aus Gipskristallen. Daraus resultiert nicht nur eine ökologische, sondern auch eine sehr ökonomische Herstellung mit geringem Energiebedarf im Vergleich zu zementären Bindemitteln [19, 20].

In der folgenden Abbildung 1 ist der Stoffkreislauf des Gipssystems dargestellt. Das Schaubild basiert aus den Informationen der Quellen [8, 30].

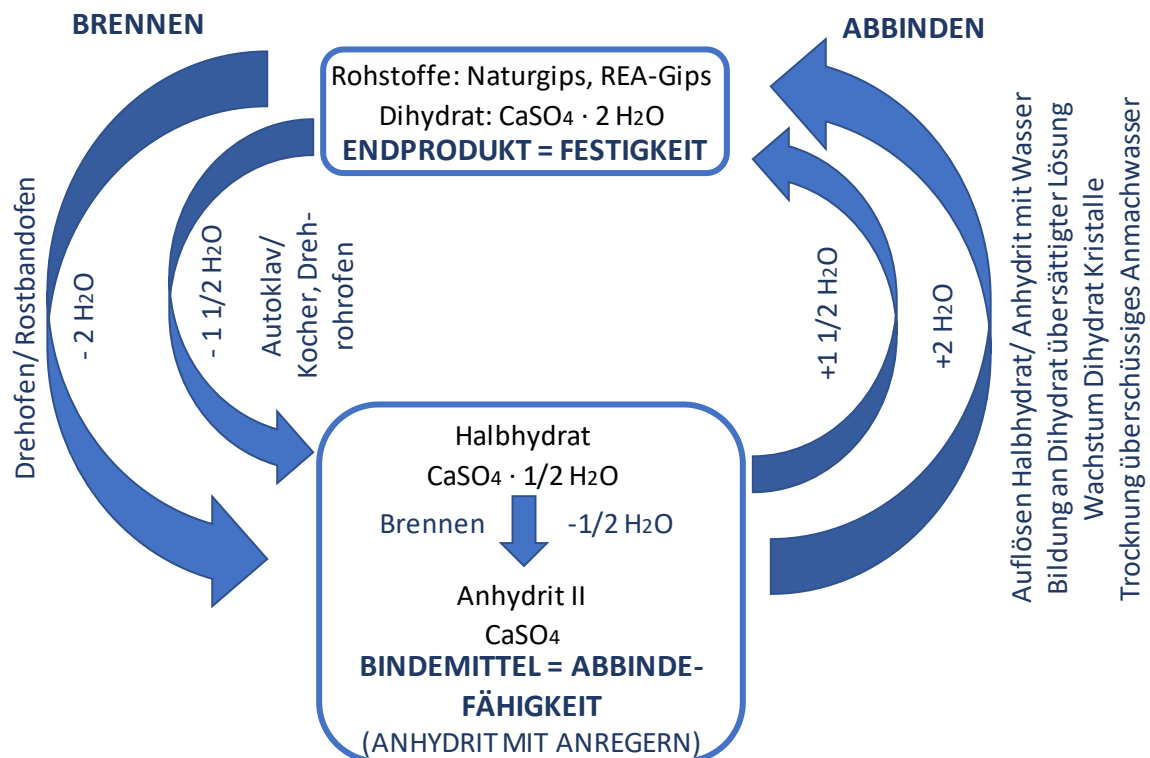


Abbildung 1: Der Gipskreislauf

2. Literaturrecherche

Gipsbaustoffe zeichnen sich durch ein hohes Wassersaug- und Wasserdampfspeichervermögen aus, auf diese die guten bauphysikalischen und wohnklimatischen Eigenschaften zurückzuführen sind [3, 12]. Das feinporige Gefüge sorgt bei gleichzeitiger Offenlegung des Gipskörpers für einen guten Schallschutz und eine hohe Wärmeisolierung. Zudem werden diese Baustoffe für Brandschutzmaßnahmen eingesetzt, da sie durch Abgabe des Kristallwassers feuerhemmend wirken [12].

Nachteilig ist allerdings der Einsatz im Außenbereich oder in Räumen mit andauernder, hoher Luftfeuchtigkeit, da es bei Durchfeuchtungen zu Löseerscheinungen kommen kann, die festigkeitsmindernd wirken [3, 8, 12]. Außerdem ist im Gipssystem kein Korrosionsschutz für Stahl gegeben, da die geringen pH-Werte keine Passivierung ermöglichen [12]. Da im Gegensatz zu zementären Estrichen die Notwendigkeit einer Bewehrung allerdings nicht besteht, ist diese Eigenschaft nicht weiter von Bedeutung.

2.1.1. Rohstoffe und technische Calciumsulfate

DH kommt nicht nur natürlich im Gipsstein vor, sondern auch synthetisch als Kraftwerksnebenprodukt bei der Rauchgasentschwefelung als REA-Gips. Beide Calciumsulfate können als Ausgangsstoff für die Herstellung von thermischen Anhydrit verwendet werden [18, 28].

In Abhängigkeit an die Brenntemperatur entstehen bei der Entwässerung unterschiedliche Formen. Bei Temperaturen von 180 °C - 240 °C entsteht AIII, von 240 °C - 600 °C AII schwerlöslich und unlöslich und ab Temperaturen über 600 °C entsteht AI für Estrichgipse, der sich aufgrund seiner versinterten Kornoberflächen durch einen niedrigen Wasseranspruch und einer geringeren Reaktivität auszeichnet [18, 30]. Durch die hohen Brenntemperaturen setzt außerdem der Zersetzungsprozess ein, sodass zusätzlich CaO frei gebildet wird. Zuletzt entsteht ab einer Temperatur über 1180 °C Al, welcher außerhalb dieses Temperaturbereichs instabil ist und nicht weiter relevant ist [3].

Neben dem natürlichen Anhydrit gibt es noch die synthetische Form, welche bei der Flusssäuregewinnung entsteht. Das daraus resultierende Gipsprodukt weist hohe Festigkeiten und eine gute Verarbeitbarkeit auf und findet aufgrund dessen häufig Anwendung bei den Calcium-sulfatfließestrichen (CAF) [18, 30].

Zuletzt spielt das im Autoklaven bei Temperaturen von 110 °C - 140 °C teilentwässerte α -Halbhydrat für die Calciumsulfatestrichherstellung eine immer wichtigere Rolle. Im Vergleich zu β -HH weist es ein gröberes Kristallgefüge ohne Hohlräume auf, welches zu einem geringeren Wasseranspruch und somit zu höheren Festigkeiten führt [12, 28, 30]. Zudem ist

2. Literaturrecherche

es im Vergleich zu A II sehr reaktiv und kann nur mit Zugabe von Verzögerern weiterverarbeitet werden [28, 30]. Bei den Anhydriten bedarf es dagegen einer Anregung, um sie als Bindemittel (BM) verwenden zu können, da sie den Abbindeprozess ansonsten nicht innerhalb der technologisch nutzbaren Zeit ermöglichen [18, 30].

2.1.2. Hydratation/ Abbinden

Das Wasser, welches beim Brennprozess ausgetrieben wird, wird bei der Rehydratation wieder in das Kristallgefüge eingebaut [2]. Wird beispielsweise α -HH in Wasser eingestreut, beginnt dieses sich schnell aufzulösen, da es bei Raumtemperatur metastabil ist [22]. Da die Löslichkeit bei einer Temperatur von 20 °C von α -HH mit 6,7 g/l höher ist als die von DH mit 2 g/l, bildet sich eine an DH übersättigte Lösung [11, 15, 18]. Daraufhin bilden sich DH-Keime aus, die weiter zu Kristalliten heranwachsen und sich verfilzen [15, 18, 22]. Durch den hohen Löslichkeitsunterschied zwischen α -HH und DH wird α -HH sehr schnell aufgelöst, somit läuft auch der Abbindeprozess schnell ab [2, 11].

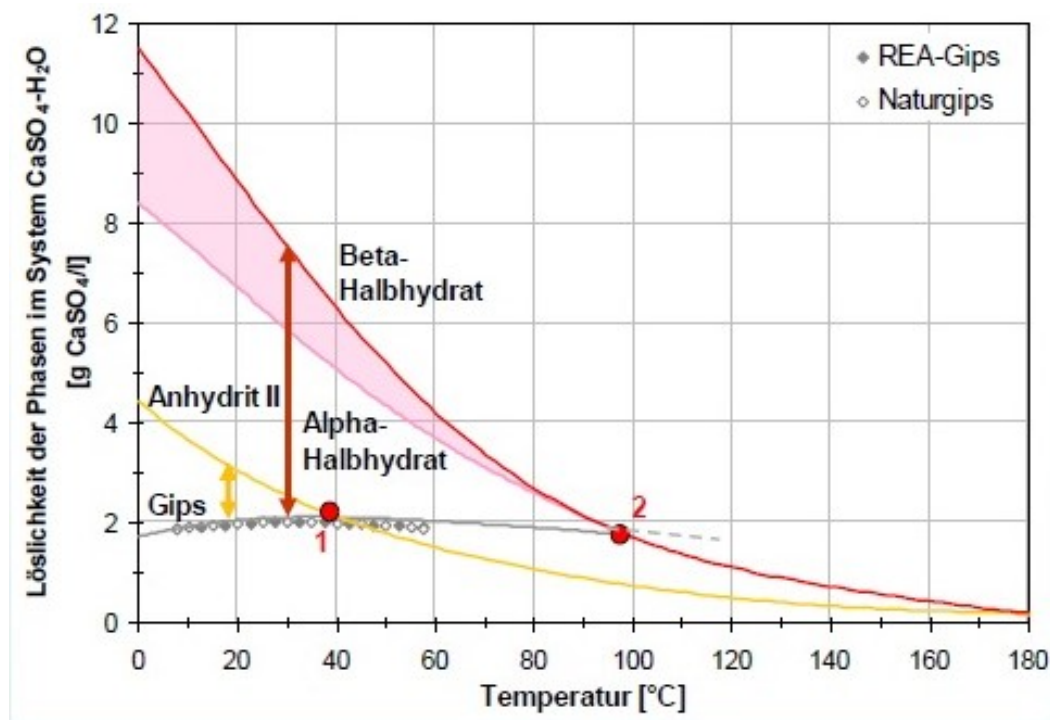


Abbildung 2: Löslichkeit der Calciumsulfate in Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur nach FORERST 1957, FREYER 2000, MÜLLER 2007 [21]

Vergleichbar läuft die Hydratation von A II ab, allerdings darf hier eine Temperatur von ca. 42 °C nicht überschritten werden, da dann die Löslichkeit von DH größer ist als von A II. Zudem ist die Differenz der beiden Löslichkeiten, wie in der Abbildung 2 erkennbar, mit 2 g/l

2. Literaturrecherche

zu 2,7 g/l sehr gering, folglich schreitet die Auflösung des Anhydrits viel langsamer voran als die des α -HH. Ohne weitere Maßnahmen, wie die Zugabe von Anregern oder die Aufmahlung von Anhydrit, um eine größere spezifische Oberfläche und somit auch eine höhere Reaktivität zu erzeugen, würde die Hydratation in einigen Fällen bis zu mehreren Monaten oder Jahren benötigen [2].

Bei der Hydratation von AIII hingegen bildet sich erst eine Zwischenstufe in Form von Halbhydrat aus, bevor die DH-Kristallite entstehen können [11, 18, 21].

Mit dem Verbrauch der anhydritischen Phase gehen immer weniger Ionen in Lösung, d.h. die Übersättigung an DH nimmt allmählich ab und die Reaktion verlangsamt sich [21]. Erst wenn das überschüssige Wasser verdunstet ist und eine vollständige Trocknung vorliegt, kann der Baustoff die geforderten Festigkeiten erzielen. Die Erhärtung setzt mit dem Ende des Kristallwachstums ein [18].

2.2. Calciumsulfatfließestriche

Ein Estrich besteht nach DIN EN 13318 aus einer oder mehreren Schichten Estrichmörtel oder nach DIN 18560 aus Trockenelementen, die entweder direkt auf den tragenden Untergrund aufgetragen werden oder auf Zwischenschichten, wie Trenn- oder Dämmschichten. Des Weiteren sind Heizestriche ebenfalls möglich [3, 26, 30].

Estriche haben die Funktion, gleichmäßige Höhenlagen zu erreichen, den Bodenbelag aufzunehmen oder unmittelbar genutzt zu werden [3, 30].

Ein Calciumsulfatestrich (CA) muss aus einem oder mehreren Calciumsulfatbindemitteln bestehen [3]. Diese werden in 2.2.1. näher erläutert.

Im Vergleich zu zementären Estrichen weisen calciumsulfatbasierte Systeme eine hohe Raumbeständigkeit und sehr geringe Schwindmaße auf, da das Verhältnis der Volumina zwischen Ausgangsstoffen zum Endprodukt inklusive Trocknungsschwinden ungefähr identisch ist. Wie in 2.1. bereits erwähnt, erweisen sich CA bei Brandschutzaufgaben als vorteilig, aber nachteilig beim Einsatz in dauerfeuchten Bereichen [9, 12, 29]. Zudem erreichen CA schneller die Belegreife [29] und erzielen so eine Zeit- und somit auch eine Kostenersparnis auf der Baustelle.

Die Lieferung kann als Baustellenmischung in konventioneller Mörtelkonsistenz erfolgen oder als Compound, welcher unter Zugabe von Fließmitteln und anderen Zusatzmitteln in fließfähiger Konsistenz als Fahrmischer-, Sack- oder Siloware zur Baustelle transportiert werden kann [29, 30]. Letzteres beschreibt einen Calciumsulfatfließestrich.

2. Literaturrecherche

Im Vergleich zu konventionellen CA erzielen CAF eine höhere Einbauleistung, da keine Verdichtung mehr notwendig ist [3, 9]. Der Fließestrich ist selbstnivellierend und muss lediglich grob verteilt und mittels einer Schwabbelstange entlüftet werden [3, 30]. Somit wird der Bauablauf durch die Erleichterung der Ausführung verbessert [9].

Es sind geringere Nenndicken möglich, da der CAF eine höhere Biegezugfestigkeit aufweist und sehr dicht ist [9]. Aufgrund der hohen Dichtigkeit ist eine möglichst geringe Dicke anzustreben, da der Estrich ansonsten nicht vollständig trocknen und somit die Anforderungen nicht erfüllen [9, 29].

Zu berücksichtigen sind eventuell auftretende Oberflächenerscheinungen wie Sedimentationen oder Hautbildungen [29]. Aufgrund dessen ist ein Anschleifen der Estrichoberfläche erforderlich [8, 29]. Konnte der Estrich allerdings nicht vollständig austrocknen, verhindert auch das Abschleifen die Bildung dieser Schichten nicht [8]. Sie bestehen aus einer Mischung aus Feinmörtel und Fließmittel und wirken sich nachteilig auf die Trocknungsgeschwindigkeit und Festigkeiten aus [26].

Eine weitere negative Konsequenz, welche aus einem unvollständig getrockneten CAF bzw. einem nachträglichen Feuchteintrag resultieren kann, ist eine mögliche Nachhydratation und einer damit einhergehenden späten Kristallbildung aus der Anhydritkomponente des Binde-mittels [26, 29]. Anhydrit erreicht i.d.R. keinen Hydratationsgrad von 100 % und ist somit noch im bereits getrockneten und erhärteten Bauteil vorhanden [26]. Durch den nachträglichen Kontakt mit Wasser hydratisiert der Anhydritrest im Bauteil nach und bildet Kristallite mit einem höheren Volumen als zuvor aus [29]. Folglich kann es zu einer Beulen- und Rissbildung kommen [26, 29].

Ein erhöhter W/B-Wert sollte unbedingt vermieden werden, da es dadurch zu verlängerten Austrocknungszeiten kommt und die geforderten Festigkeiten nicht erreicht werden. Zudem kann der Estrichsand sedimentieren und Schwindrisse und/oder Pocken können entstehen [9]. Üblich sind Werte zwischen 0,40 und 0,50, bei größeren Fließmittelmengen, kann der W/B-Wert noch weiter reduziert werden [16].

Trotz der zuletzt genannten möglichen Fehler, welche aber ohne enormen Aufwand vermieden werden können, bieten CAF im Vergleich zu konventionellen CA eine außerordentliche Zeit- und Kostenersparnis, da der Einbau schneller und einfacher erfolgen kann. Allerdings ist die Konfektionierung anspruchsvoller, da der Einsatz von Zusatzmitteln und das Einstellen der Verhältnisse der einzelnen Komponenten zueinander eine höhere Sachkenntnis erfordert als bei konventionellen CA. [9]

2. Literaturrecherche

2.2.1. Materialien

Bindemittel

Für den Einsatz in CA werden i.d.R. verschiedene Anhydrite, wie Naturanhydrit (NA), synthetischer Anhydrit (SA) und thermischer Anhydrit (TA) und α -HH verwendet. Die letzten beiden Ausgangsstoffe können sowohl aus REA-Gips als auch aus Naturgips hergestellt werden [29]. Bei der eingesetzten Anhydrit-Phase handelt es sich i.d.R. um A II, welche wie in 2.1.1. bereits erwähnt, ab einer Temperatur von über 240 °C entsteht [10, 18].

A II und α -HH unterscheiden sich sehr in ihrem Kristallgefüge und somit auch in ihrem Reaktionsverhalten und ihrer Hydratationsgeschwindigkeit [29]. Die Löslichkeit bei 20 °C mit 6,7 g/l von α -HH ist größer als die des Anhydrits II mit 2,7 g/l [15, 18]. Daraus folgt, dass die Geschwindigkeit des Kristallwachstums von α -HH wesentlich höher ist als von A II [2]. Zudem wäre A II ohne Anreger nicht abbindefähig [29].

Aus dem unterschiedlichen Reaktionsverhalten der beiden Calciumsulfatbindergruppen resultieren stark voneinander abweichende Hydratationsgrade (HG) [9, 13]:

Tabelle 1: Hydratationsgrade der Calciumsulfatbinder [9, 13]

BM	Naturanhydrit	Synthetischer Anhydrit	Thermischer Anhydrit	α -HH
HG	0,45-0,55	0,60-0,70	0,85-0,90	0,95

Folglich wäre zu erwarten, dass nach der Erhärtung eines Estrichs mit allen vier Komponenten im BM, NA in einer verhältnismäßig großen Menge vorliegt, wohingegen α -HH nahezu vollständig hydratisiert ist und im erhärteten Baustoff nicht mehr vorkommt.

Des Weiteren weisen die BM aufgrund ihres Reaktionsverhaltens und des HG unterschiedliche Endfestigkeiten auf [9, 28]. Diese Festigkeitswerte unterliegen allerdings noch weiteren Faktoren, wie beispielsweise dem W/B-Wert und der Feinheit der Ausgangskörnung [9]. Laut FISCHER und STARK kann TA Festigkeiten bis 65 N/mm², SA zwischen 50 N/mm² - 60 N/mm² und NA zwischen 40 N/mm² - 45 N/mm² erreichen [9]. Allerdings werden an dieser Stelle keine entsprechenden Angaben für α -HH und für den eingestellten W/B-Wert gemacht. Letzterer wäre für die Vergleichbarkeit verschiedener Festigkeitswerte unabdingbar.

Hersteller geben allerdings Werte von Druckfestigkeiten > 40 N/mm² bei einem W/B-Wert von 0,30 an [13].

2. Literaturrecherche

Darüber hinaus beeinflusst die Bindemittelart die Oberflächenqualität des Estrichs maßgebend durch die Länge der Abbinde- und Trocknungszeiten [9].

Zudem spielt die Längenänderung bei Compositbindern eine entscheidendere Rolle als bei reinen Bindemitteln, da die Komponenten, wie bereits erwähnt, unterschiedlich schnell hydratisieren. So können Spannungen entstehen, die Längenänderungen hervorrufen können, welche unbedingt durch Einhalten eines Randstreifens ausgeglichen werden müssen [9].

Gesteinskörnung

Für CA werden meistens silikatische Gesteinskörnungen (GK) wie Quarzsand, carbonatische wie Kalksteinsplitter oder sulfatische wie gebrochener Naturanhydrit verwendet [3, 28]. Das Größtkorn darf nach DIN 18560 maximal 1/3 der Estrichnenndicke betragen und darf dabei 8 mm nicht überschreiten [28]. Nach DIN 4226 sollte die Kornzusammensetzung im Idealfall in der oberen Hälfte des günstigen Sieblinienbereichs, aber mindestens im brauchbaren Bereich liegen [28]. Die üblichen Korngruppen sind 0/2, 0/4, 0/6 und 0/8 und sind abhängig von der jeweiligen Anwendung [3].

Ist der Mehlkorngelhalt nicht optimal eingestellt, kann es zu Sedimentationserscheinungen kommen, welche nicht nur eine schlechte Oberflächengüte zur Folge haben, sondern im Fall eines zu hohen Mehlkorngelhalts den Wasserbedarf erhöhen und somit zu niedrigen Festigkeiten führen können [9].

Die Kornform beeinflusst zudem die Verarbeitbarkeit des Estrichmörtels enorm [17]. Es ist eine kugelige Form anzustreben, da so das Nivellierverhalten optimiert wird [9].

Gängige Verhältnisse von Bindemittel zu Gesteinskörnung liegen bei 1:2, bzw. 1:3 [9].

Für calciumsulfatbasierte Estriche sollten nur gewaschene Gesteinskörnungen verwendet werden, da so keine schädigende Bestandteile mit dem Bindemittel reagieren können [17, 28]. Dies könnten beispielsweise abschlämmbare Bestandteile wie Tone und Lehme sein, welche zu schlechten Qualitäten und Festigkeiten führen können, da der Haftverbund zwischen BM und GK verschlechtert wird und Risse im Bauteil entstehen können [9]. Zementäre Verunreinigungen können ebenfalls Risse hervorrufen, was ebenfalls eine geringe Festigkeit zur Folge haben könnte [9]. Organische Stoffe sollten auch nicht in der Gesteinskörnung vorhanden sein, da diese zwar in erster Linie einen optischen Schaden in Form einer Verfärbung bedingen, aber zudem dazu führen könnten, dass beim Aufbringen von Belägen keine optimale Haftung zwischen Estrich und Belag besteht [9]. Zuletzt sind noch lösliche Chloride zu nennen, welche durch Bildung von Calciumchloriden zu Ausblühungen führen können [9].

2. Literaturrecherche

Nach DIN 12620 müssen sandige Gesteinskörnungen für CA folgende Anforderungen hinsichtlich ihrer Korngrößenverteilung erfüllen:

- Feinstanteile: $\leq 3 \text{ M.-%} \leq 0,063 \text{ mm}$ [17]
- Größtkorn: 4 mm oder 8 mm [17]
- Hauptkornspektrum: bis 2 mm $\leq 70 \text{ M.-%}$ [17]

Es gelten noch weitere Anforderungen, wie beispielsweise an die Festigkeiten, Raumbeständigkeit, Kornoberfläche, Affinität zum Bindemittel, den Widerstand gegen Hitze oder das Aussehen. Darüber hinaus gibt es noch Anforderungen an die Verschleißfestigkeit oder den Widerstand gegen Witterung und Frost, welche aber nur im Straßenbau oder in Außenbauteilen relevant sind. [17]

Zusatzmittel

Für CAF ist das Fließmittel (FM) als Zusatzmittel die wichtigste Komponente. I.d.R. werden FM auf Basis von Polycarboxylatether (PCE), Melaminsulfonaten oder Naphthalinsulfonaten eingesetzt [28]. Durch den Einsatz von FM ist es möglich, den W/B-Wert bei gleichbleibender Konsistenz zu senken, sodass im Vergleich zu konventionellen CA die Festigkeit erhöht und die Ausführung erleichtert wird. In Abhängigkeit an die Art des FM müssen unterschiedliche Dosierungen eingestellt werden, da die FM unterschiedlich stark auf die Fließfähigkeit des Estrichs einwirken. Vor allem bei den PCEs muss die Dosierung sehr sensibel und genau vorgenommen werden, da sie schon bei geringen Abweichungen erhebliche Unterschiede bei der Konsistenz des Mörtels hervorrufen können. Dies liegt an den zusätzlichen Seitenketten, die zum einen eine sterische Abstoßung der Partikel untereinander hervorrufen und zum anderen Wassermoleküle anlagern, welche einen stabilen Film bilden und somit eine Annäherung der BM-Partikel verhindern. Konventionelle FM bestehen zwar auch aus Polymermolekülen, besitzen jedoch keine zusätzlichen Seitenketten wie die PCEs und bedingen so nur eine elektrostatische Abstoßung der einzelnen Partikel. [2]

Zudem werden aber noch weitere Zusatzmittel benötigt, um die Verarbeitbarkeit der CAF zu ermöglichen. Dazu gehören Verzögerer, wie beispielsweise Wein-, Zitronensäuren und Aminosäure-Verbindungen, aber auch Zucker und Leime [18, 28], die das Abbinden des α -HH verlangsamen. Sie bilden Calciumkomplexe oder schwerlösliche Calciumverbindungen aus, die sich auf die Kristallite absetzen und so die Keimbildung unterdrücken und damit die Lösungsgeschwindigkeit des α -HH herabsenken [2, 14]. So wird ein verfrühtes Erstarren unterbunden.

2. Literaturrecherche

Gleichzeitig sind aber auch Anreger, wie Kalkhydrat, Kaliumsulfat oder auch Zement nötig, die den Abbindeprozess von A II beschleunigen [18, 28]. Dabei unterscheidet man zwischen sulfatischer Anregung (z.B. K_2SO_4 , Na_2SO_4) und basischer Anregung (z.B. $Ca(OH)_2$ und Zement). Die Anreger bewirken die Erhöhung der molaren Löslichkeit von A II, sodass die Löslichkeitsdifferenz zwischen A II und DH vergrößert wird und in Folge dessen die DH Kristalle schneller gebildet werden [2, 14]. Ohne diese Anreger würde das Bauteil mit einem hohen A II-Gehalt im BM eine zu lange Erhärtungszeit bis zur Belegreife benötigen.

Stabilisierer auf Polyethylenoxidbasis senken die Sedimentationsneigung und optimieren die Verarbeitbarkeit des Estrichmörtels [28]. Dabei handelt es sich um organische Polymere, welche einen stärkeren Verbund der Wassermoleküle bewirken, sodass sich große und träge Molekülkonglomerate bilden, welche die Viskosität des Frischmörtels erhöhen und die Entmischungsneigung senken [2, 14]. Zudem können auch feinkörnige anorganische Substanzen wie wässrige Suspensionen aus Silikatstaub verwendet werden, welche Agglomerate bilden, in denen das freie Wasser eingeschlossen wird und somit für ein erhöhtes Wasserrückhaltevermögen sorgen [2, 14]. Letztere werden allerdings nicht in calcium-sulfatbasierten Systemen eingesetzt, da sich die entstehenden CSH-Phasen und die damit einhergehende Gefügeverdichtung und Schwindneigung nachteilig auf den Mörtel auswirken.

Üblicherweise wird Methylcellulose verwendet, welche es sowohl in löslicher als auch in quellfähiger Form gibt. Sie ist kostengünstig und umweltverträglich und ist daher eines der marktführenden Produkte. Neben der Gewährleistung von Wasserretentionen weist dieses Polymer zusätzlich verzögernde Eigenschaften auf. Dies muss bei der Dosierung berücksichtigt werden, um zu lange Abbindezeiten zu vermeiden. [5]

Welche Stabilisiererart beim zu untersuchenden, marktüblichen Compound zum Einsatz kommt, ist allerdings nicht bekannt.

Das Einstellen der idealen Zusatzmittelzusammensetzung und die gleichzeitige Abstimmung mit der vorliegenden Bindemittelmischung und Gesteinskörnung bedürfen in der Herstellung einer hohen Fachkompetenz und vielzähliger praktischen Erfahrungswerte.

2.2.2. Anforderungen

Ein CAF kann, wie bereits genannt, aus einem oder mehreren Bindemitteln bestehen. Darüber hinaus können neben Zusatzmitteln auch Zusatzstoffe hinzugegeben werden [3]. Für reine Calciumsulfatbinder und für Compositbinder gelten folgende Anforderungen nach

2. Literaturrecherche

DIN 13454 an die Zusammensetzung:

- Binder: min. 85% CaSO_4 , Zusatzmittel (Anreger, FM, Verzögerer) können enthalten sein [3]
- Compositbinder: min. 50% CaSO_4 , Zusatzstoffe (Puzzolane, Zement, Kunstharz) und Zusatzmittel (Anreger, FM, Verzögerer) können enthalten sein [3]

Des Weiteren muss der Estrich eine Ebenheit gewährleisten, welche vor allem bei Aufnahme von Bodenbelägen relevant ist. Die zulässigen Maßtoleranzen sind in DIN 18202 geregelt. Es gibt Vorgaben für Ebenheits- und Winkeltoleranzen, die optische Beeinträchtigungen im Bodenbelag verhindern sollen. Diese gilt es vor allem bei konventionellen Estrichen zu prüfen, da Fließestriche durch ihre Eigenschaften weniger anfällig für Unebenheiten in der Oberfläche sind. [1]

Zudem muss der Estrich frei von Verunreinigungen, wie beispielsweise Putzreste, Staub oder Öl sein, damit eine gleichmäßige und vollflächige Haftung der einzelnen Bodenelemente gewährleistet werden kann. Nach DIN 18560 müssen konventionelle Estriche und Fließestriche gebürstet oder angeschliffen werden. Bei CAF erfolgt üblicherweise ein Reinigungs-schliff mittels einer Ein- oder Mehrscheibenschleifmaschine und im Anschluss wird die Oberfläche abgesaugt. [1]

Die Saugfähigkeit des Estrichs muss an den jeweiligen Belag angepasst werden, damit sie beispielsweise nicht zu schnell den Spachtelmassen oder Klebstoffen, welche für das Verlegen des Belags notwendig sind, das Wasser entziehen. Ansonsten könnten Schäden in der Kontaktzone entstehen, welche einen schlechten Haftverbund zur Folge hätten. Aufgrund dessen wird ein Voranstrich auf den Estrich aufgetragen, um eine gleichmäßige Saugfähigkeit zu gewährleisten. [1]

2.2.3. Mechanische Eigenschaften

Der Estrich muss eine den Belastungen entsprechende und gleichmäßig verteilte Festigkeit vorweisen, damit er statische und dynamische Belastungen verformungs- und schädigungsfrei in die darunter liegenden Schichten weiterleiten kann [1].

CAF werden nach DIN EN 13813 hinsichtlich der Anforderungen an die Druck- und

2. Literaturrecherche

Biegezugfestigkeiten in folgende Klassen sortiert:

Tabelle 2: Ausschnitt Festigkeitsklassen nach DIN EN 13813 [3]

Klasse	Druckfestigkeit (N/mm ²)	Klasse	Biegezugfestig- keit (N/mm ²)
C12	12	F2	2
C16	16	F3	3
C20	20	F4	4
C25	25	F5	5
C30	30	F6	6
C35	35	F7	7
...

Die Festigkeitsklassen werden in Abhängigkeit an die Estrichart, die Belagsart und die spätere Nutzung ausgewählt. Bevor der Bodenbelag auf den Estrich aufgebracht werden kann, gilt es die Oberflächenbeschaffenheit zu prüfen, wie Oberflächenhärte und Haftzugfestigkeit. Erst wenn diese Werte den geforderten Angaben entsprechen, darf der entsprechende Belag aufgebracht werden [1]. Empfohlen werden nach DIN für Calciumsulfat-Werkmörtel Druckfestigkeitsklassen zwischen C 12 - C 60 und Biegezugfestigkeitsklassen zwischen F 3 - F 20.

2.2.4. Trocknungs- und Formänderungsverhalten

Der Versteifungsbeginn soll frühestens nach 30 min und das Ende spätestens nach 12 h einsetzen [3], um eine bestmögliche Ausführung auf der Baustelle zu gewährleisten.

Ob ein Estrich die Belegreife erreicht hat, ist über die zulässige Restfeuchte in Abhängigkeit an die Bindemittel-, Estrichbauteil- und Bodenbelagsart definiert [1]. Sie ist also die Ausgleichs-feuchte, bei der sich eine konstante Feuchte nach ausreichend langer Zeit in Abhängigkeit an die Umgebungsbedingungen bei porösen Baustoffen eingestellt hat [26, 30]. Nach DIN 18353 und 18560 sind Estriche gleichmäßig dick herzustellen, um unterschiedliche Restfeuchten zu vermeiden [1]. Denn erst wenn der Grenzwert flächendeckend erreicht ist, darf der Belag verlegt werden [1]. Vor allem bei CAF gilt es, eine möglichst geringe Nenndicke einzuhalten, da so die Feuchtigkeit schnell abgeführt werden kann [26]. Schließlich wirkt ein zu hoher Feuchtegehalt im CAF nicht nur festigkeitsmindernd, sondern kann auch Schäden im Belag hervorrufen. Ein zementärer Estrich kann dagegen nacherhärten [26, 30]. Somit gelten für CAF deutlich niedrigere Restfeuchten:

2. Literaturrecherche

Tabelle 3: Zulässige Restfeuchte nach DIN 18365 [1, 26, 30]

Estrichart	Zementestrich (Restfeuchte in M.-%)	CAF (Restfeuchte in M.-%)
Belag dampfdicht	$\leq 2,0$	$\leq 0,5$
Belag dampfdurchlässig	$\leq 2,5$	$\leq 1,0$

Folglich ist es bei CAF von enormer Wichtigkeit, dass das überschüssige Anmachwasser nach der Hydratation vollständig verdunsten kann, denn nur so kann sich das Gefüge verdichten und die Festigkeit zunehmen [8].

Die Austrocknungsgeschwindigkeit hängt neben der Bindemittelart von vielen weiteren Faktoren ab, wie beispielsweise dem W/B-Wert und der Dichte, Art und Sieblinie der Gesteinskörnung, Porenanteil und -art [9, 26]. Ein hoher W/B-Wert kann verstärkt zu Sedimentationen im CAF führen, welche die Trocknungszeit verlängern können [9, 30]. Ebenso können die Umgebungsbedingungen den Trocknungsprozess beeinflussen, z.B. durch eine niedrige Luftfeuchtigkeit und eine erhöhte Temperatur trocknet das überschüssige Wasser des CAF schneller aus [9]. Ein vorschriftgemäßes Lüftungsregime ist daher einzuhalten.

Während des Abbindens unterliegt der CAF einer Volumenänderung [10]. Bei der Umbildung von HH und Wasser zu DH ist eine Volumenabnahme von 9,4 % direkt nach dem Anrühren messbar [10]. Hierbei handelt es sich um einen chemischen Schwindprozess, der noch im plastischen Zustand abläuft [30]. Dieser Effekt wird von dem Wachstum der Gipskristalle überdeckt, welche ineinander wachsen und so einen Druck erzeugen, welcher zu einer Volumenexpansion, bzw. zu einem chemischen Quellen führen kann [10]. Auch dieser Vorgang ist i.d.R. unproblematisch für das Bauteil, da auch dieser im plastischen Zustand abläuft [30].

Nachdem der Wachstumsprozess abgeschlossen ist, verdunstet das überschüssige Kristallwasser und der Gipskörper schwindet [10]. Dieses Trocknungsschwinden ist bei calciumsulfatbasierten Bindemitteln nicht so schwerwiegend wie bei zementären Bindemitteln, da letztere weniger Kapillarporen und mehr Gelporen enthalten [9, 12, 29]. Kapillarporen können bis zum Über-, bzw. Unterschreiten eines Feuchtegehaltes schwind-, bzw. quellfrei Wasser aufnehmen [30]. Bei CAF ist mit Schwindmaßen von 0,20 mm/m nach DIN 13454 zu rechnen.

Zudem kann die Temperatur ebenfalls eine Volumenänderung initiieren. Je nach Temperaturerniedrigung oder -erhöhung kann ein thermisch bedingtes Dehnen oder Schrumpfen die Folge sein [9, 10]. Bei einem üblichen CAF ist mit einem Wärmedehnungskoeffizienten von 0,010 - 0,016 mm/mK zu rechnen [3].

Das Formänderungsverhalten hängt nicht nur von den bereits beschriebenen Faktoren wie

2. Literaturrecherche

Bindemittelart, Porenart und -anteile, W/B-Wert und Umgebungsbedingungen ab, sondern auch von der Art und der Aufbereitung der jeweiligen Gesteinskörnung. Wenn diese noch quellende Bestandteile wie Tone oder Lehme enthalten, können sie ebenfalls ein Quellen bedingen [17, 28]. Entsprechend dazu stellte WIEGRINK in seinen Untersuchungen fest, dass der Wärmedehnungskoeffizient weniger vom Bindemittel sondern überwiegend von der Gesteinskörnung abhängt [30]. Beispielweise besitze Kalkstein einen Wärmedehnungskoeffizienten von $5,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$, wohingegen Quarz einen doppelt so hohen Wert aufweise [30]. Dies verursache dementsprechend unterschiedliche Ergebnisse bei der Verwendung desselben Bindemittels. Außerdem verweist er auf eine Untersuchung von WEIGGLER, welche aussagt, dass hauptsächlich Körner $> 4 \text{ mm}$ den Wärmedehnungskoeffizienten wesentlich beeinflussen [30].

Zuletzt kann auch das Herstellungsverfahren der Bindemittel das Formänderungsverhalten beeinflussen, da dieses das Gefüge der Bindemittel bedingt [9].

Letztendlich beeinflusst eine sehr hohe Anzahl unterschiedlichster Faktoren das Formänderungs- und Trocknungsverhalten eines Estrichs, welche es erschweren, Abhängigkeiten einzelner Einflüsse herauszuarbeiten und zu beurteilen [9]. Dies sollte während der Untersuchungen und der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt werden.

2.3. Möglichkeiten und Herausforderungen für die Gipsindustrie

2.3.1. Aktuelle Situation: Alternative zu REA-Gips

In Deutschland wird die Gipsnachfrage zurzeit durch etwa 60 % REA-Gips und 40 % Naturgips gedeckt (Stand 2017) [6]. Aufgrund der Energiewende wird die Anzahl der Kohlekraftwerke in den nächsten Jahren immer weiter minimiert, bis sie schließlich bis 2050 komplett durch alternative Maßnahmen ersetzt werden sollen [6, 27]. Somit würde der REA-Gips, welcher als Nebenprodukt in den Rauchgasentschwefelungsanlagen der Kohlekraftwerke anfällt, als Rohstoff für die Gipsindustrie langfristig nicht mehr zur Verfügung stehen [6, 27].

Als Maßnahme könnte der Ausbau der Naturgipsquelle in Betracht gezogen werden, da Deutschland im Vergleich zu seinen Nachbarländern ein relativ hohes Naturgipsvorkommen zur Verfügung steht [6]. Allerdings bedingt der Tagebau stets einen großen Eingriff in die Natur. Berücksichtigt werden muss aber, dass die Gipsindustrie für die ehemaligen Steinbrüche entsprechende Renaturierungskonzepte vorsieht, wie beispielsweise Hydrosaat-spritzen und Neubepflanzung von Bäumen [27], sodass diese angemessen in die umgebende Natur zurückgeführt werden können [3, 27].

2. Literaturrecherche

Von Seiten der EU-Kommission spräche nichts gegen den Abbau, auch nicht aus Naturschutzgebieten, solange ein Beitrag zur Biodiversität geleistet wird [3]. Dennoch sprechen sich Naturschützer gegen den Naturgipsabbau in diesen Gebieten aus, da der Zustand nach dem Gipsabbau niemals dem des Ausgangszustand entspräche und schützenswerte Landschaften und Pflanzenarten zerstört werden würden [27]. Teilweise wird aber durch die Renaturierungsmaßnahmen eine vielfältigere Flora und Fauna geschaffen als in der ursprünglichen Landschaft.

Wünschenswert wäre eine langfristige Betrachtung seitens der Naturschützer, welche häufig nur den Jetzt-Zustand beurteilen und die Renaturierungsmaßnahmen dabei oft außer Acht lassen [8]. Am Ausbau der Qualität und Quantität von Recycling-Gips, welcher zur Zeit nur in einem geringem Maße eingesetzt werden kann, arbeite die Industrie stets, doch der allmähliche Umstieg auf diese Rohstoffquelle ist nur über einen längerfristigen Zeitraum zu realisieren [27]. Daher sind die Naturgipsvorkommen für diese Übergangszeit nach dem Prinzip „so wenig wie möglich, so viel wie nötig“ zu nutzen, um der Nachfrage nach Gipsbaustoffen noch nachzukommen und gleichzeitig die Arbeitsplätze zu sichern [8, 27].

Folglich gilt für die Gipsindustrie das richtige Gleichgewicht zwischen Deckung der Ressourcennachfrage und der Wahrung der Interessen der beteiligten Gruppen zu finden.

Bei der Konfektionierung des CAF im Rahmen dieser Arbeit muss diese Problematik ebenfalls vorausschauend bedacht werden. Je nach Bindemittelmischung können bis zu 95 % der Rohstoffe aus REA-Gips bestehen, sodass alternative Rohstoffquellen in Betracht gezogen werden müssen.

Anzustreben wäre es, den Anteil an α -HH und TA überwiegend aus RC-Gips zu gewinnen. Aktuell darf RC-Gips nur begrenzt im Produkt eingesetzt werden. Bis der Recyclingprozess optimiert und die Anteilsbeschränkung heraufgesetzt wird, ist es unumgänglich Naturgips als Rohstoffquelle für α -HH und TA zu verwenden. Eine stufenweise Erhöhung des Naturgipsanteils gegenüber des REA-Gips-Anteils wäre sinnvoll, um eventuelle Beeinflussung der Eigenschaften festzustellen und den Mörtel dementsprechend beispielsweise mithilfe von Additiven zu optimieren.

Dennoch sollte der maximale Anteil an RC-Gips im CAF ausgeschöpft werden, um zeitnah den Einfluss dieser Rohstoffquelle auf die Eigenschaften des Mörtels zu ermitteln. Somit ist eine stufenweise Änderung der Anteile der jeweiligen Rohstoffquellen sinnvoll, um frühzeitig die Auswirkung dieser Umstellung auf den CAF zu erkennen und zudem dem allmählichen Wandel der Verfügbarkeit dieser Rohstoffe gerecht zu werden.

2. Literaturrecherche

2.3.2. Gipsrecycling

Die Bedeutsamkeit des Recyclings von Gipsbaustoffen nimmt nicht nur wegen des Rückgangs bis hin zum Wegfall von REA-Gips und der Umweltschutz- und Tourismuskussionen bezüglich des Naturgipsabbaus zu, sondern auch aufgrund der verschärften Deponie-verordnungen, die die Menge an Gipsbaustoffresten in Deponien und Tongruben reduzieren sollen [25].

In Deutschland werden 7 Mio. t Gipsprodukte jährlich produziert (Stand 2012), davon sind 50 % Gipselemente, 33 % Mörtel und 17 % Abbinderegler für die Zementherstellung [19]. In Neubauten werden jährlich 9 Mio. t verbaut [20].

Eine genaue Aussage über das Abfallaufkommen aller Gipsprodukte in Deutschland ist schwierig, da es für die Schätzungen verschiedene Ansätze gibt, die voneinander abweichen. Der Output Ansatz schätzt das Gipsabfallaufkommen in Deutschland im Jahr 2006 auf 5,47 Mio. t [20].

Berücksichtigt man nur die Gipskartonplattenreste, sind eindeutiger Werte zu finden. Im Jahr 2015 fielen ca. 280.000 t Gipskartonreste in Deutschland an und davon wären 210.000 t recyclingfähig [6]. Bis zum Jahr 2030 sollen sich diese Werte mehr als verdoppeln (670.000 t Gipskartonreste, davon 550.000 t recyclingfähig). [6]

Zurzeit existieren in Deutschland zwei Recyclinganlagen für Gipskartonplatten, welche 2014 und 2015 in Betrieb gegangen sind. 2015 wurden weniger als 20.000 t RC-Gips aus den Gipskartonresten hergestellt, damit wurde nur knapp 1/10 des potentiell verwertbaren Abfallaufkommens in RC-Gips umgewandelt.

Deutschland bildet mit diesen Zahlen neben Ländern wie Frankreich, Großbritannien, Dänemark und Schweden aber das Schlusslicht, da die anderen EU-Länder kein vergleichbares Naturgipsvorkommen und REA-Gips Angebot zur Verfügung haben und stärker auf Recyclingprodukte angewiesen sind [6]. Frankreich hat sich beispielsweise das Ziel gesetzt, bis 2020 70% der recyclingfähigen Gipsreste zu verwerten, ein Wert der in Deutschland völlig utopisch wäre [6]. Allerdings gehen die Nachbarländer so mit einem guten Beispiel voran, an denen sich die deutsche Gipsindustrie orientieren kann, sodass mit einem raschen und intensiven Ausbau der Recyclingqualität und -quantität zu rechnen ist. Erst wenn es gelingt, die Aufbereitungskosten mit den Kosten für die Deponierung zumindest gleichzusetzen (zur Zeit sind diese doppelt so teuer, Stand 2012 [25]) kann mit einer intensiveren Zunahme des Recyclingmaterials gerechnet werden.

Neben dem Ziel der Steigerung der RC-Gips Menge, gilt es auch, die Qualität zu verbessern, damit die Einsatzmöglichkeiten für das Produkt vielfältiger werden. Um potentielle Schäden

2. Literaturrecherche

zu vermeiden und die Baustoffqualität so hoch wie möglich zu halten, wird RC-Gips zurzeit mit einem Anteil von maximal 30 % dem Gipskartonplatten hinzugegeben [6]. Bei höheren Zugabemengen wird das Endprodukt dem vom Bundesverband Gips bereitgestellten Qualitätskriterien nicht gerecht [6].

Zur Verbesserung der Qualität von RC-Gips müssen folgende Prozessschritte optimiert werden:

- Sortierung Gips aus Bauschutt in sortenreinen Zustand [19]
- Rückbau/Demontage: bisher nur RC-Gips aus Trockenestrichen und Platten möglich [19]
- Aufbereitung: verschiedene Optionen [19]:
 - o Feinkornabsiebung: geringe Effektivität
 - o Sortierverfahren: sortenreiner Zustand Voraussetzung
 - o Thermisches Verfahren: sehr aufwändig und kostenintensiv

Anzustreben wäre das sogenannte „Cradle-to-Cradle“ Prinzip, welches eine 100%-ige Zurückgewinnung der verbauten Rohstoffe als Zielsetzung hat [23]. Das Denken erfolgt dann nur noch in Produktkreisläufen [23], welche mit dem Stoffkreislauf des Gipses einhergehen würden. Die Verwendung von Mehrstoffsystemen inklusive Zusatzmittel erschwert aber die Problematik der sortenreinen Trennung des Bauschutts enorm und stellt in Anbetracht an das Kreislaufdenken die größte Herausforderung für die Baustoffindustrie dar. Wenn dieser Prozessschritt aber soweit optimiert werden würde, wäre ein großer Schritt in Richtung „Cradle-to-Cradle“
getan.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.1. Materialien

Für die nachfolgenden Untersuchungen sollen folgende Materialien untersucht werden:

Bindemittel

Tabelle 4: Bezeichnung und Komponenten der Bindemittelmischungen

Proben- bezeichnung	Ref	Sta	A	B	C
Name	Referenz	Standard	Mischung A	Mischung B	Mischung C
Bindemittel- Komponenten	- 80 % α -HH - 20 % A II	- 80 % α -HH - 20 % A II	- 80 % α - HH - 15 % TA - 5 % NA	- 80 % α - HH - 20 % TA	- 20 % α - HH - 80 % TA

Beim Referenz-Compound handelt es sich um einen Estrichcompound, welcher bereits Zusatzmittel, wie Fließmittel, Anreger, Verzögerer und Stabilisierer enthält. Die genauen Arten und Dosierungen sind allerdings nicht bekannt. Der Standard-Compound enthält die identische Zusatzmittelrezeptur, allerdings sind dort keine Verzögerer enthalten.

Die Mischungen der eigens hergestellten BM wurden in Mengen von je 5 kg hergestellt. Dafür wurden die einzelnen Komponenten abgewogen, in ein Gefäß gegeben und für einen Zeitraum von 2 min unter ständigem Rühren homogenisiert. Gelagert wurden die Bindemittel-mischungen in luftdicht verschlossenen Eimern bei Normklima.

Gesteinskörnung

Tabelle 5: Bezeichnung und Eigenfeuchten der Sande

Probenbezeichnung	NS	A +	B -	D -
Name	Normsand	Rendler	Ringelheim	Tschechien Svetla
Eigenfeuchte [%]	0,00	2,68	4,26	3,44

Die verwendeten Sande sind dieselben, welche in einer vorangegangenen Kollegarbeit untersucht wurden, dementsprechend werden die Bezeichnungen übernommen [24]. Die

3. Experimentelle Untersuchungen

Sande weisen unterschiedliche Eigenfeuchten auf und unterscheiden sich auf den ersten Blick in ihrer Farbigkeit und ihrer Korngrößenverteilung, wie in den Abbildungen 3 - 5 gut erkennbar ist. Der Sand B - ist gräulich und die Sande A+ und D - sind braun-gräulich.

Die Gesteinskörnungen lösten bei den Längenänderungsuntersuchungen mittels Schwindrinne im Rahmen des wissenschaftlichen Kollegs unterschiedlich starke Volumenexpansionen in Verbindung mit dem Referenzcompound aus.

Sand D - verursachte in Verbindung mit dem Referenz-Compound in einem Messzeitraum von knapp 19 Tagen die stärkste Längenänderung von 1,63 mm/m und der Sand B - die zweitstärkste Längenänderung von 1,41 mm/m. Der Mörtel mit dem Normsand wies mit 0,02 mm/m nach knapp 13 Tagen keine nennenswerte Längenänderung auf und der Sand A + bewirkte eine Längenänderung von 0,19 mm/m nach 13 Tagen, welche aber vermutlich bei einem längeren Messzeitraum noch weiter angestiegen wäre.

Sämtliche Ergebnisse aus den vorangegangenen Untersuchungen sind der Vollständigkeit halber im Anhang 2 zusätzlich aufgeführt, an dieser Stelle wird aber nicht näher darauf eingegangen und auf die wissenschaftliche Kollegarbeit verwiesen [24].

Um den zeitlichen Aufwand und den Materialeinsatz so gering wie möglich zu halten, wird für die weiterführenden Untersuchungen überwiegend der Sand B - eingesetzt. Einzelne Analysen werden ebenfalls zum Vergleich mit Sand A + und D - durchgeführt und der Sand C - wird außer Acht gelassen.



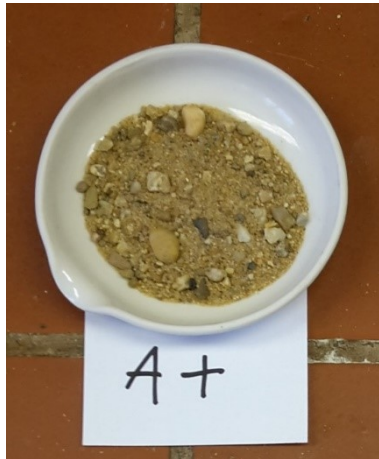
Abbildung 3: Sand A+



Abbildung 4: Sand B -

Abbildung 5: Sand D -

3. Experimentelle Untersuchungen



Zusatzmittel und Zusatzstoffe

Den Bindemittelmischungen werden unterschiedliche Additive, wie Verzögerer, Fließmittel und Anreger zugesetzt. Um die optimalen Eigenschaften der Mörtel einzustellen, werden verschiedene Dosierungen und Arten von Zusatzmitteln erprobt.

Tabelle 6: Arten der Zusatzmittel und -stoffe

Zusatzmittel/ Zusatzstoff	Art	Form
Verzögerer	- Retardan (Calciumsalz einer polykondensierten Aminosäure)	- pulverförmig
	- Seignettensalz (Kaliumnatriumtartrat)	- pulverförmig
Fließmittel	- Melaminharz	- pulverförmig
	- PCE 1	- pulverförmig
	- PCE 2	- pulverförmig
Anreger	- Kaliumsulfat	- pulverförmig
	- Weißkalkhydrat (CL90)	- pulverförmig

Um auch an dieser Stelle den Versuchs- und Materialaufwand möglichst gering zu halten, werden nicht alle Analysen mit jeder Zusatzmittelart und -dosierung durchgeführt, sondern vorwiegend die optimalen Rezepturen verwendet. Die eingesetzten Dosierungen werden in den einzelnen Versuchsbeschreibungen genau beschrieben.

3.2. Charakterisierung der Bindemittel

Vorab wird an dieser Stelle auf die Differenzierung der Bedeutung der Begrifflichkeiten Bindemittel-Mischung und Bindemittel-Compound hingewiesen, um Missverständnisse zu vermeiden. Die Bindemittel-Mischung beschreibt eines der eigens hergestellten BM mit den jeweiligen Komponenten wie α -HH, TA oder NA. Der Bindemittel-Compound enthält neben dem BM bereits die jeweiligen Zusatzmittel.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.2.1. Spezifische Oberfläche

Die spezifische Oberfläche der Bindemittelkomponenten wird nach BET bestimmt. Dazu werden die Proben vorab bei 40 °C getrocknet und anschließend im Analysegerät COULTER untersucht. Für die Gasadsorption wird Stickstoff verwendet.

Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt.

Tabelle 7: Spezifische Oberflächen der Bindemittelkomponenten nach BET

Probenbezeichnung	Spezifische Oberfläche [m ² /g]
α-Halbhydrat	0,70
Natürlicher Anhydrit	2,02
Thermoanhydrit	3,36

Die unterschiedlichen spezifischen Oberflächen sind Resultate aus dem Herstellungsprozess. α-HH besitzt mit 0,70 m²/g die geringste spezifische Oberfläche. Aufgrund seiner hohen Reaktivität, resultierend aus dem hohen Löslichkeitsunterschied zu DH, ist eine große spezifische Oberfläche durch einen intensiven Mahlprozess nicht erforderlich.

Im Gegensatz dazu verhält es sich bei den beiden Anhydriten. Der natürliche Anhydrit, der als A II-Modifikation vorliegt, besitzt nur einen geringen Löslichkeitsunterschied zu DH (siehe Abschnitt 2.1.2, Abbildung 2). Aufgrund dessen würde der NA ohne weitere Maßnahmen nur sehr langsam und unvollständig hydratisieren. Neben dem Einsatz von Anregern, die das Löslichkeitsprodukt von A II erhöhen, wird NA aufgemahlen, um eine hohe spezifische Oberfläche zu erzeugen und gleichzeitig die Reaktivität zu erhöhen.

Die höchste spezifische Oberfläche besitzt der TA, da durch den Entwässerungsvorgang des feinteiligen REA-Gipses eine hohe Porosität der Partikel erzeugt wird.

3.2.2. Chemische Analyse

Die Bindemittelkomponenten werden mittels Chemischer Analyse auf ihren Gehalt von K₂O und Na₂O untersucht, die sich vor allem in ihrer wasserlöslichen Form auf den pH-Wert auswirken können. Zudem wird der Gehalt an wasserlöslichen Chloriden, welche das Potential

3. Experimentelle Untersuchungen

besitzen, Ausblühungen auszulösen und freiem CaO untersucht. CaO kann bei hoher thermischer Beanspruchung während der Herstellung von TA, bzw. A-II E entstehen, sobald A ab einer bestimmten Temperatur mit dem Zersetzungsprozess beginnt. Freies CaO fungiert durch die Steigerung des Löslichkeitsproduktes von A II während der Hydratation als Anreger [2].

Tabelle 8: Ergebnisse der Chemischen Analyse der Bindemittelkomponenten

	α -HH [%]	NA [%]	TA [%]
K ₂ O	0,05	0,05	0,08
Na ₂ O	0,08	0,10	0,10
wl. K ₂ O	0,01	0,01	0,02
wl. Na ₂ O	0,01	0,01	0,02
wl. Cl	0,003	0,01	0,007
fr. CaO	0,00	0,00	0,00

Die Anteile der untersuchten Komponenten unterscheiden sich nur geringfügig innerhalb der einzelnen Bindemittelbestandteile. Tendenziell enthält TA mehr Alkalien als die anderen Proben.

3.2.3. Phasenanalyse mittels XRD

Die einzelnen Bindemittelkomponenten werden mittels XRD quantitativ auf ihre Phasenbestandteile untersucht. Dazu werden sie bei 40 °C getrocknet und mittels eines Siebes mit einer Maschenweite von < 63 µm gesiebt. Bis zur Prüfung wurden die Proben luftdicht gelagert. Als Probenträger wird ein Kunststoffprobenträger mit einer 1 mm hohen Umrandung verwendet. Das Material wird in dem Diffraktometer XRD 3003 TT MZ VI mit 12-fach Probenwechsler, Fa. Seifert untersucht. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 9: Quantitative Phasenanalyse der Bindemittelkomponenten mittels XRD; n.b.= nicht bestimmbar

Phase/ Bindemittel	α -HH	TA	NA
Bassanit	99,9 %	n.b.	n.b.
Anhydrit	n.b.	98,5 %	95,6 %

3. Experimentelle Untersuchungen

Gips	n.b.	< 1 %	4,4 %
Quarz	<< 1 %	< 1 %	n.b.
Calcit	n.b.	n.b.	n.b.

Die reinste Bindemittelkomponente ist das α -HH mit 99,9 % Bassanit-Anteil. Es enthält zudem noch Spuren von Quarzverunreinigungen.

Der Thermoanhydrit enthält 98,5 % Anhydrit und Spuren von Gips und Quarz. Somit unterlag diese Komponente einem geringen Alterungsprozess. Durch die Probenpräparation ist dieser, trotz luftdichter Lagerung, allerdings nie vollständig zu vermeiden.

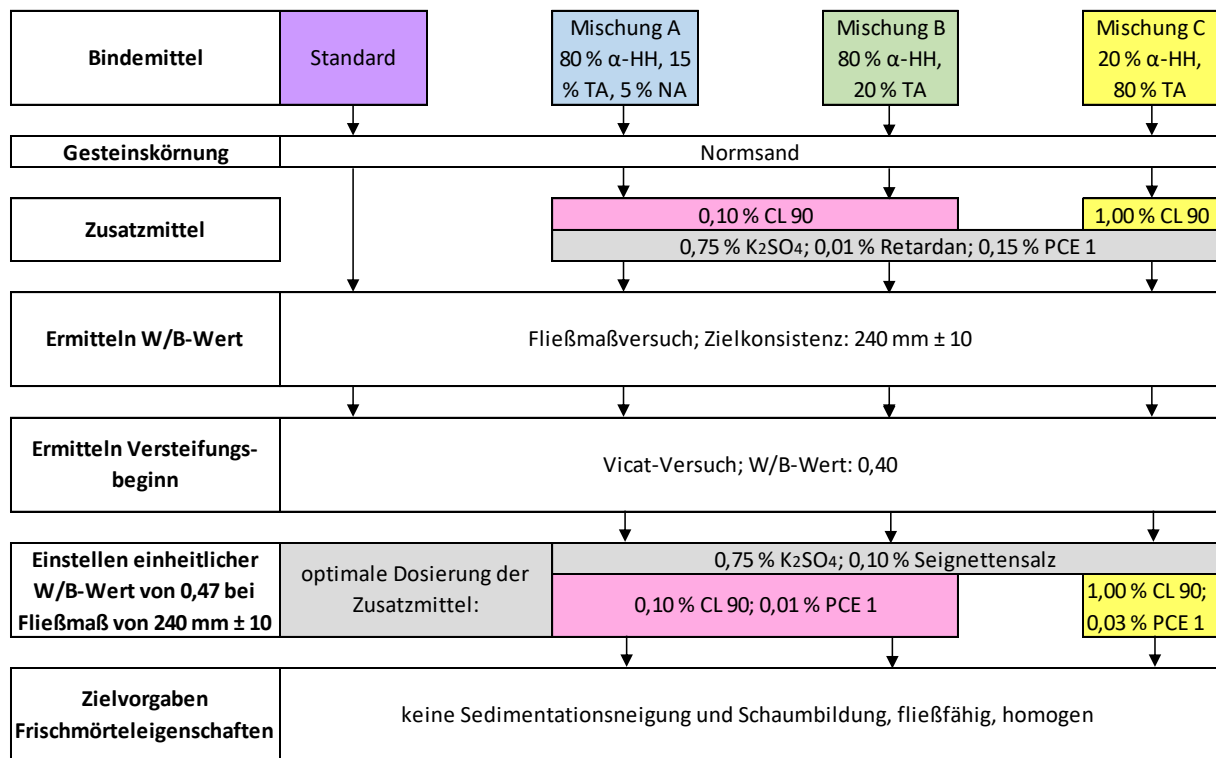
Der natürliche Anhydrit enthält nur 95,6 % Anhydrit und 4,4 % Gips. Durch den hohen Gipsanteil liegt die Annahme nahe, dass diese Bindemittelkomponente schon eine vorzeitige Alterung erfahren hat, welche nicht nur aus der Probenpräparation resultiert. Zudem handelt es sich um einen natürlichen Rohstoff, der aus Anhydritgestein gewonnen wird, dementsprechend ist Gips als Nebenbestandteil durchaus üblich. Der hohe Gipsanteil wird sich vermutlich auf den Hydratationsverlauf auswirken, dies muss bei den nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt werden.

3.3. Voruntersuchungen der Mörtel

Um eine Rezeptur zu ermitteln, welche die optimalen Eigenschaften der Mörtel bewirkt, bedarf es Voruntersuchungen, um die Auswirkungen der unterschiedlichen Zusatzmittelarten und -dosierungen zu untersuchen. Als Orientierungshilfe dient dabei der Standardcompound, damit alle Frischmörtel letztendlich identische Konsistenzen bei gleichbleibendem W/B-Wert aufweisen, um so die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Voruntersuchungen sind im nachfolgenden Diagramm dargestellt.

3. Experimentelle Untersuchungen

Voruntersuchungen - Einstellen der optimalen Dosierungen der Zusatzmittel der Bindemittel



Ergebnisse beziehen sich auf:

Standard	BMC
BMA	BMA, B
BM B	BMA, B, C

Abbildung 6: Versuchsplan Voruntersuchungen

Der Übersichtlichkeit halber werden einige Untersuchungswiederholungen, wie beispielsweise die des Fließmaßversuchs, nicht dargestellt. Die Ergebnisse werden aber im Abschnitt 3.3.1. ausführlich dargestellt und erläutert.

Um den Materialaufwand möglichst gering zu halten, werden die Voruntersuchungen ausschließlich an den Mörteln mit Normsand durchgeführt. Der Mörtel wird in einem Verhältnis BM/GK von 35:65 in einem Mörtelmischer der Marke Kitchen Aid Modell KSM90 (220 - 240 V ,50/60 Hz, 300 W) angerührt. Zudem wird das folgende Mischregime für alle Untersuchungen angewendet:

- 15 s Gips in Wasser Einstreuen
- 30 s Sumpfen
- 15 s Stufe 1 + gleichzeitiges Einstreuen der Gesteinskörnung
- 60 s Stufe 2

3. Experimentelle Untersuchungen

3.3.1. Ermitteln der W/B-Werte mittels Fließmaßversuch

Zu Beginn werden die W/B-Werte bei einem vorgegebenen Fließmaß von 240 mm \pm 10 mittels Fließmaßversuch nach DIN EN 1045-2 ermittelt. Dieser Versuch wird im Laufe der Arbeit mehrfach mit unterschiedlichen Zusatzmitteldosierungen wiederholt, um eine optimale Konsistenz einzustellen.

Der Mörtel aus 280 g Bindemittel und 520 g Gesteinskörnung wird mit der jeweiligen Wassermenge gemischt. Vorab werden die Zusatzmittel den jeweiligen Bindemittel-Mischungen zugegeben und unter 2-minütigem Rühren trocken homogenisiert. Dem Standard-Estrichcompound wurden bereits werksintern Zusatzmittel hinzugeben.

Der Setztrichter aus rostfreiem Stahl wird mittig auf eine 300 mm breite Glasscheibe gesetzt und in der Halterung der Abhebevorrichtung befestigt. Der Mörtel wird in dem Mörtelmischer nach dem bereits genannten Mischregime angerührt und bis zum Einfüllen in den Setztrichter händisch mit dem Spatel weiter verrührt. Überschüssiger Mörtel wird mit einem Abstreichlineal entfernt. Der Einfüllvorgang ist nach 165 s nach dem Einstreuen in Wasser abgeschlossen. Nach weiteren 15 s wird der Setztrichter mit der automatischen Abhebevorrichtung vertikal angehoben und der Mörtelkuchen wird mit einem Stahllineal in zwei rechtwinklig zueinander-stehenden Richtungen gemessen. Die Messwerte wurden auf 10 mm gerundet.

Die Dosierung der Zusatzmittel der Versuchsreihe 1 war wie folgt:

Tabelle 10: Dosierung Zusatzmittel Fließmaßversuch Reihe 1, Fließmaß 240 mm \pm 10

Zusatzmittel/-stoff	Dosierung Mischung A bzgl. BM [%]	Dosierung Mischung B bzgl. BM [%]	Dosierung Mischung C bzgl. BM [%]
Weißkalkhydrat CL90	3,00	3,00	3,00
Kaliumsulfat K ₂ SO ₄	0,75	0,75	0,75
Retardan	0,01	0,01	0,01
Fließmittel PCE 1	0,15	0,15	0,15

Die Ergebnisse der ersten Fließmaßversuchsreihe sind in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 11: Ergebnisse Fließmaßversuch Reihe 1, Fließmaß 240 mm \pm 10

Mörtelkomponenten	Compound Sta + Normsand	Compound A + Normsand	Compound B + Normsand	Compound C + Normsand
Probenbezeichnung	Ref (NS) 1	A (NS) 1	B (NS) 1	C (NS) 1
W/BM-Wert	0,47	0,35	0,345	0,35

Die Mörtel der Compounds A (NS) 1, B (NS) 1 und C (NS) 1 sind sehr zähflüssig und weisen

3. Experimentelle Untersuchungen

eine sehr starke Sedimentationsneigung auf. Nachdem Anheben des Setztrichters wird diese ersichtlich, da sich die Komponenten sofort entmischen. In der Mitte des Mörtelkuchens häuft sich vermehrt die Gesteinskörnung an, während das Wasser und feinere Bindemittelpartikel zum äußeren Rand des Kuchens laufen. Dementsprechend wird der Mörtelkuchen mit der Zeit auch immer breiter, was den Messvorgang und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse untereinander erschwert. Gemessen wird zwar zu einem einheitlichen Zeitpunkt von 210 s, dennoch sind die ermittelten W/B-Werte in ihrer Aussagekraft kritisch zu bewerten, da die starke Sedimentation die Ergebnisse verfälscht.

Die Probe Sta (NS) 1 weist mit 0,47 zwar den höchsten W/B-Wert auf, aber sie hat auch eine fließfähige Konsistenz und somit auch eine bessere Verarbeitbarkeit, als die anderen Proben. Der Mörtel zeigt keinerlei Sedimentationsneigungen auf und war sehr homogen.

Um die Zähigkeit der Mörtel mit den eigens hergestellten Compounds zu reduzieren, wird die Weißkalkhydratdosierung bei der Versuchsreihe 2 reduziert, da durch den erhöhten Feinststoffgehalt die Fließfähigkeit der Frischmörtel verringert wird:

Tabelle 12: Dosierung Zusatzmittel Fließmaßversuch Reihe 2, Fließmaß 240 mm \pm 10

	Compound A	Compound B	Compound C
Dosierung CL90 bzgl. BM [%]	0,10	0,10	1,00

Beim Compound C wird mit einem höheren CL 90-Gehalt gearbeitet, da aufgrund des hohen Anhydritgehalts, auch ein höherer Anteil des Anregers benötigt wird. Alle anderen Zusatzmitteldosierungen entsprechen der Versuchsreihe 1. Die W/B-Werte bei dem vorgegebenen Fließmaß von 240 mm \pm 10 der Versuchsreihe 2 sind wie folgt:

Tabelle 13: Ergebnisse Fließmaßversuch Reihe 2, Fließmaß 240 mm \pm 10

Mörtelkomponenten	Compound A + Normsand	Compound B + Normsand	Compound C + Normsand
Probenbezeichnung	A (NS) 2	B (NS) 2	C (NS) 2
W/B-Wert	0,345	0,33	0,36

Die Sedimentationsneigung aller Proben wurden zwar reduziert, allerdings sind die Konsistenzen nicht so homogen und fließfähig wie bei dem Referenzmörtel. Weiterhin fällt auf, dass die Mörtel A (NS) 2, B (NS) 2 und C (NS) 2 zu einer starken Schaumbildung neigen, welche sowohl auf zu lange Mischzeiten als auch auf das Fließmittel zurückzuführen sein könnte. Das FM könnte möglicherweise eine Wechselwirkung mit dem Verzögerer eingehen, welche

3. Experimentelle Untersuchungen

diese Schaumbildung hervorrufen könnte.

Somit ergeben sich für die Versuchsreihe 3 folgende Maßnahmen:

- Erhöhen des W/B-Werts auf 0,40 einheitlich für A (NS) 3, B (NS) 3 und C (NS) 3
- Senken der Fließmitteldosierung (0,10 %; 0,05 %)

Diese Versuchsreihe führt allerdings zu keinen genauen Werten, da beim Absenken des PCE-Fließmittelgehalts der Mörtel sehr schnell seinen Versteifungsbeginn erreicht hat. Die Dosierung des Fließmittels wird zuerst auf 0,10 % reduziert, wodurch der Mörtel allerdings zu fließfähig wird und die Breite der Glasplatte mit > 300 mm überschreitet. Bei einer Fließmitteldosierung von 0,05 % läuft der Mörtel nach dem Anheben des Setztrichters allerdings nicht mehr auseinander, da der Versteifungsprozess schon eingetreten ist. Die verzögernde Wirkung des PCE-Fließmittels darf folglich nicht unberücksichtigt bleiben und muss bei einer Reduzierung seiner Dosierung mit einem optimalen Verzögerergehalt ausgeglichen werden. Zudem muss die negative Wechselwirkung zwischen Fließmittel und Verzögerer durch die Wahl der idealen Verzögererart minimiert werden.

An dieser Stelle wird die Fließmaß-Untersuchung unterbrochen, um eine geeignete Einstellung von Fließmittel- und Verzögerer-Gehalt und -art mittels Erstarrungsbeginn-Analyse zu er-mitteln.

3.3.2. *Ermitteln des Erstarrungsbeginns mittels Vicat-Versuch*

Diese Aspekte werden mittels Vicat-Versuch nach DIN EN 13454-2 untersucht, indem unterschiedliche Verzögerer- und PCE-Arten und -dosierungen erprobt werden, bis der nach DIN 13454-1 geforderte Erstarrungsbeginn von ≥ 30 min erreicht wird.

Der Mörtel aus 105 g Bindemittel und 195 g Gesteinskörnung wird mit einem einheitlichen W/B-Wert von 0,40 gemischt, um zum einen die Vergleichbarkeit der Proben untereinander zu gewährleisten, da der Wassergehalt bei dem Erstarrungsprozess einen entscheidenden Einfluss ausübt. Zum anderen wird der Wert im Vergleich zu den in Abschnitt 3.3.1. ermittelten W/B-Werte erhöht, da die Frischmörtel mit den eigens hergestellten Compounds schlecht verarbeitbar sind.

Vorab werden die Zusatzmittel den jeweiligen Bindemittel-Mischungen zugegeben und unter 2-minütigem Rühren homogenisiert. Aus Materialeinspargründen wird dieser Versuch ausschließlich an dem Mörtel mit dem Compound A und dem Standard-Estrichcompound durchgeführt. Da die Compounds A und B aufgrund ihres hohen und identischen α -HH-

3. Experimentelle Untersuchungen

Gehalts am frühesten reagieren müssten, wird es als ausreichend betrachtet, nur eines dieser Com-pounds auf die Erstarrungszeit hin zu untersuchen. Bei dem Mörtel mit dem Compound C (80% TA-Gehalt) wäre ein späterer Erstarrungsbeginn zu erwarten, sodass dieser auf jeden Fall die Anforderung erfüllen sollte.

Vom vorgegebenen Mischregime der Norm zum Herstellen des Mörtels wird allerdings abgewichen, da die Mischzeit mit 3 min sehr lang ist und die Schaumbildung, welche in Versuchsreihe 2 der Fließmaßuntersuchung festgestellt wird, begünstigen würde. Stattdessen wird überwiegend mit dem Mischregime aus Abschnitt 3.3. gearbeitet. Zudem wird noch ein kürzeres Mischregime (siehe Tabelle 14) erprobt, um die Auswirkung auf die Schaumbildung zu untersuchen.

Der Vicat-Ring, welcher aus Hartgummi besteht und nach DIN 13454-2 eine Kegelstumpfform mit bestimmten geometrischen Abmessungen aufweist, wird auf eine gefettete Glasplatte gestellt. Das Vicat-Gerät wird mit einer zylinderförmigen Stahlnadel ausgerüstet, justiert und auf die Ausgangsstellung angehoben. Die Mörtelmasse wird unmittelbar nach dem Misch-vorgang in den Vicat-Ring ohne zusätzliche verdichtende Maßnahmen eingefüllt. Überschüssiges Material wird mit einem Spatel abgestrichen, sodass eine glatte Mörteloberfläche entsteht. Nach einer angemessenen Zeit wird die Befestigung der Vicat-Nadel gelöst, sodass diese vertikal in den Mörtel eindringen kann. Sobald die Nadel nicht mehr weiter eindringt, wird der Wert der Skala abgelesen, welche den Abstand zwischen Nadelende und Glasplatte angibt. Die einzelnen Prüfstellen sind mindesten 10 mm voneinander und vom Rand des Vicat-Rings entfernt. Der Erstarrungsbeginn ist erreicht, sobald der Skalenwert (6 ± 3) mm beträgt. Dieser wird ab dem Beginn des Mischvorgangs gemessen und auf 1 min gerundet angegeben. Die DIN sieht eine Aufrundung von 5 min vor, da aber viele Mischungen sehr frühe und nah beieinanderliegende Erstarrungsbeginne aufweisen, wird an dieser Stelle mit genaueren Werten gearbeitet.

Die Ergebnisse sämtlicher Proben mit ihren genauen Rezepturen, Mischzeiten und beobachteten Auffälligkeiten sind in nachfolgender Tabelle aufgeführt:

3. Experimentelle Untersuchungen

Tabelle 14: Ergebnisse Erstarrungsbeginn-Untersuchung mittels Vicat-Versuch

Mischregime normal: 15s Einstreuen, 30s Sumpfen, 15s Rühren, GK Einstreuen, 60s Rühren

Mischregime kurz: 15s Einstreuen, 30s Sumpfen, 15s Rühren, GK Einstreuen, 30s Rühren

Probe	Zusatzmittel	Dosierung bzgl. BM [%]	W/B- Wert	Mischregime	Versteifungs- beginn [min]	Auffälligkeiten
Standard (NS)	kein VZ, Rest unbekannt	-	0,40	normal	8,00	keine Schaumbildung, homogene Masse
Standard (NS)	kein VZ, Rest unbekannt	-	0,47	normal	13,00	keine Schaumbildung, homogene Masse, leichter Wasserfilm
Referenz (NS)	enthält VZ, Rest unbekannt	-	0,40	normal	> 45,00	keine Schaumbildung, homogene Masse
Referenz (NS)	enthält VZ, Rest unbekannt	-	0,47	normal	> 55,00	keine Schaumbildung, homogene Masse, leichter Wasserfilm
Dosierung gilt für alle Proben	CL 90	0,100				
Dosierung gilt für alle Proben	K ₂ SO ₄	0,750				
A (NS) 01 Ret 15 PCE1	Retardan PCE1	0,010 0,150	0,40	normal	7,00	starke Schaumbildung, keine GK im Oberflächenbereich
A (NS) 02 Ret 15 PCE1	Retardan PCE1	0,020 0,150	0,40	normal	9,00	""
A (NS) 03 Ret 15 PCE1	Retardan PCE1	0,030 0,150	0,40	normal	14,00	""
A (NS) 04 Ret 15 PCE1	Retardan PCE1	0,040 0,150	0,40	normal	16,00	""
A (NS) 05 Ret 15 PCE1	Retardan PCE1	0,050 0,150	0,40	normal	16,00	""
A (NS) 03 Ret 08 PCE1	Retardan PCE1	0,030 0,080	0,40	normal	8,00	""
A (NS) 05 Ret 08 PCE2	Retardan PCE2	0,050 0,080	0,40	kurz	18,00	extrem starke Schaumbildung, keine GK im Oberflächenbereich
A (NS) 05 Ret 08 PCE1	Retardan PCE1	0,050 0,080	0,40	normal	14,00	starke Schaumbildung, keine GK im Oberflächenbereich
A (NS) 10 K-Na 15 PCE1	Seignettensalz PCE1	0,100 0,150	0,40	normal	24,00	starke Schaumbildung, keine GK im Oberflächenbereich
A (NS) 10 K-Na 08 PCE1	Seignettensalz PCE1	0,100 0,080	0,40	normal	37,00	""
A (NS) 10 K-Na 05 PCE2	Seignettensalz PCE2	0,100 0,050	0,40	kurz	23,00	etwas zäh, starke Schaumbildung, keine GK im Oberflächenbereich
A (NS) 10 K-Na 05 PCE1	Seignettensalz PCE1	0,100 0,050	0,43	kurz	30,00	starke Schaumbildung, keine GK im Oberflächenbereich
A (NS) 10 K-Na 08 PCE2	Seignettensalz PCE2	0,100 0,080	0,40	normal	41,00	extrem starke Schaumbildung, keine GK im Oberflächenbereich
A (NS) 20 K-Na 08 PCE1	Seignettensalz PCE1	0,200 0,080	0,40	normal	30,00	sehr zäh, mittelmäßige Schaum- bildung, keine GK im OB
A (NS) 10 K-Na	Seignettensalz	0,100	0,43	normal	24,00	homogene Masse, keine Schaumbildung
A (NS) 05 K-Na 08 PCE 1	Seignettensalz PCE1	0,050 0,080	0,40	normal	26,00	sehr zäh, mittelmäßige Schaum- bildung, keine GK im OB

Das entscheidendste Ergebnis, welches anhand der Erstarrungsbeginnzeiten sofort ersichtlich wird, ist der Einfluss der unterschiedlichen Verzögererarten. Retardan erreicht bei keiner der Rezepturen den geforderten Erstarrungsbeginn von ≥ 30 min. Das Maximum von 18 min wird unter Verwendung des PCE2 erreicht, unter Verwendung des PCE1 bei entsprechender Dosierung werden nur 14 min erreicht (siehe Probe A (NS) 05 Ret 08 PCE1 und A (NS) 05 Ret 08 PCE2). Dabei wird Retardan auf ein maximales Gehalt von 0,050 %

3. Experimentelle Untersuchungen

dosiert. Alle Retardan-Proben werden mit einem W/B-Wert von 0,40 untersucht.

Vergleichbare Seignettensalz-Proben mit dem gleichen W/B-Wert und der gleichen PCE-Dosierung von 0,080 % erzielen Erstarrungsbeginne von 41 min unter Verwendung des PCE2 und 37 min unter Verwendung des PCE1 (siehe Probe A (NS) 10 K-Na 08 PCE1 und A (NS) 10 K-Na 08 PCE2). Seignettensalz kann höher dosiert werden als Retardan und während dieser Untersuchung stellt sich heraus, dass sich eine Dosierung von 0,100 % als ideal erweist. Bei einer niedrigeren Dosierung kann der Erstarrungsbeginn von ≥ 30 min nicht mehr gewährleistet werden (siehe Probe A (NS) 05 K-Na 08 PCE1) und bei einer höheren Dosierung von 0,200 % (siehe Probe A (NS) 20 K-Na 08 PCE1) wird die Mörtelmasse sehr zäh und schlecht verarbeitbar.

Als nächstes ist der Einfluss der unterschiedlichen PCE-Arten zu nennen. Dazu eignen sich ebenfalls die bereits aufgeführten und mit rot markierten Proben. Unter Verwendung des PCE2 erreichen die Proben unabhängig der Verzögererart einen späteren Erstarrungsbeginn als unter Verwendung des PCE1. Die Unterschiede sind allerdings nicht relevant, vor allem bei den Retardan-Proben, da keine den Mindesterstarrungsbeginn erreicht. Die Werte für den Erstarrungsbeginn der Proben A (NS) 10 K-Na 08 PCE1 und A (NS) 10 K-Na 08 PCE2 liegen zwar 4 min auseinander, halten aber beide die Mindestzeit ein.

Entscheidender ist das Problem der Schaumbildung, welches in Versuchsreihe 2 der Fließmaßuntersuchungen festgestellt wird. Unter der Verwendung des PCE2 wird diese Problematik noch verstärkt, sodass die Dicke der Oberflächenschicht ohne Gesteinskörnung, welche eine direkte Folge der Schaumbildung ist, größer ist, als unter der Verwendung des PCE1. Dies hätte während der Bauausführung einen größeren Arbeitsaufwand zur Folge, da mehr Oberfläche des Estrichs abgeschliffen werden müsste. Die ideale PCE1 Dosierung unter gleichzeitiger Verwendung des Seignettensalzes lag bei 0,080 %. Bei einer niedrigeren Dosierung ist die Wirkung des Fließmittels zu gering, sodass die Mörtelmasse sehr zäh wird und der geforderte Erstarrungsbeginn nicht mehr erreicht wird (siehe Probe A (NS) 10 K-Na 05 PCE1), bei einer höheren Dosierung wäre anzunehmen, dass der erhöhte Feststoffanteil zu einem verfrühten Erstarrungsbeginn führt (siehe Probe A (NS) 10 K-Na 15 PCE1).

Zudem wird auch der Einfluss von unterschiedlichen Mischzeiten untersucht. Neben dem normalen Mischregime, welches in Abschnitt 3.3. genau erläutert wird, wird auch ein kurzes Mischregime angewandt, welches mit einer 30 s kürzeren Mischzeit durchgeführt wird (siehe Tabelle 14). Überprüft wird der Einfluss der Mischdauer auf die Schaumbildung der Mörtel. Bei der Probe A (NS) 10 K-Na 05 PCE1 wird allerdings sofort ersichtlich, dass die Schaumbildung vergleichbar mit den Proben unter dem normalen Mischregime ist. Zudem ist die Mörtelmasse stellenweise nicht ausreichend homogenisiert. Folglich wird das kurze Mischregime nicht erneut angewendet.

3. Experimentelle Untersuchungen

Zuletzt sind noch die Mörtelproben des Referenz- und Standardcompounds zu erwähnen (gelb hinterlegt). Bei den Proben mit dem Standardcompound setzt der Erstarrungsbeginn bereits nach 8 min und 13 min ein, da dort kein Verzögerer vorhanden ist. Somit wird die nach DIN geforderte Mindestzeit von ≥ 30 min nicht erreicht.

Die Proben des Referenzcompound überschreiten mit > 45 min und > 55 min nicht nur die Mindestzeit nach DIN, sondern übertreffen somit auch die Werte der Proben mit den eigens hergestellten Compounds.

Damit die Frischmörtel mit den eigens hergestellten Compounds die Mindestzeit auch erfüllen können, ergibt sich schlussfolgernd diese Idealrezeptur (bezogen auf das BM):

- W/B-Wert 0,40
- Weißkalkhydrat CL90: 0,10 % (für Bindemittel C 1,00%)
- Kaliumsulfat K_2SO_4 : 0,75 %
- Seignettensalz: 0,10 %
- PCE 1: 0,08 %

Der Vollständigkeit halber werden auch Proben mit anderen W/B-Werte untersucht, welche für die Ergebnisauswertung an dieser Stelle nicht berücksichtigt werden.

3.3.3. Ermitteln der Fließmitteldosierungen zum Erhalt eines einheitlichen W/B-Werts von 0,47 mittels Fließmaßversuch

Um eine Vergleichbarkeit der Proben untereinander zu gewährleisten, ist es notwendig den ermittelten W/B-Wert von 0,47 (bei einem Fließmaß von $240 \text{ mm} \pm 10$) der Standardprobe auch für die Mischungen anzuwenden. Dabei muss das Fließmittel dementsprechend reduziert werden. Der Versuchsaufbau ist identisch mit dem aus Abschnitt 3.3.1. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 15: Ergebnisse Dosierungen Zusatzmittel Fließmaßversuch Reihe 4, Fließmaß $240 \text{ mm} \pm 10$, W/B-Wert 0,47

Zusatzmittel/-stoff	Dosierung Mischung A bzgl. BM [%]	Dosierung Mischung B bzgl. BM [%]	Dosierung Mischung C bzgl. BM [%]
Weißkalkhydrat CL90	0,10	0,10	1,00
Kaliumsulfat K_2SO_4	0,75	0,75	0,75
Seignettensalz	0,10	0,10	0,10
Fließmittel PCE 1	0,01	0,01	0,03

3. Experimentelle Untersuchungen

Die Konsistenz der Mörtelproben A (NS) 4, B (NS) 4 und C (NS) 4 ist nun vergleichbar mit der Referenzprobe. Sie sind homogen, fließfähig und sehr gut verarbeitbar. Die Sedimentationsneigung, welche in der Versuchsreihe 1 festgestellt wird, ist nicht mehr zu beobachten. Allerdings ist noch eine leichte Schaumbildung erkennbar, welche aber im Vergleich zu Versuchsreihe 2 reduziert wird. Aufgrund des erhöhten Wasseranspruchs der Probe C (NS) 4, ist zum Erreichen der gleichen Konsistenz eine höhere Fließmitteldosierung notwendig als bei den Proben A (NS) 4 und B (NS) 4. Dies liegt primär am hohen TA-Gehalt, welcher mit $3,36 \text{ m}^2/\text{g}$ die höchste spezifische Oberfläche aller BM-Komponenten aufweist (siehe Abschnitt 3.2.1). Aus dieser Eigenschaft resultiert folglich ein erhöhter Wasseranspruch.

Da die Mörtel aus dieser Versuchsreihe mit einem hohen W/B-Wert und einer niedrigen Fließmitteldosierung eine enorm verbesserte Konsistenz und somit auch Verarbeitbarkeit aufweisen als die Mörtel aus den vorherigen Versuchsreihen mit niedrigeren W/B-Werten und höheren Fließmitteldosierungen, werden für die weiterführenden Versuche die Mörtelrezepturen aus der Reihe 4 verwendet. Außerdem ist so stets eine direkte Vergleichbarkeit mit der Standardprobe gewährleistet, da der gleiche W/B-Wert von 0,47 bei einem Fließmaß von $240 \text{ mm} \pm 10$ angewandt wird.

Dennoch muss die Tatsache berücksichtigt werden, dass die vorangegangenen Untersuchungen nur am Normsand erfolgten. Mit Abweichungen der Ergebnisse bezüglich der Mörtel Eigenschaften unter der Verwendung der GK A +, B - und D - ist zu rechnen.

3.4. Hauptuntersuchungen

Die Hauptuntersuchungen verfolgen die eigentliche Aufgabenstellung zur Herstellung eines volumenstabilen Fließestrichs. Dazu werden die Mörtelproben der Compounds unter Verwendung der kritischen Gesteinskörnung mit der Standardprobe (vereinzelt auch mit der Referenzprobe) auf ihr Längenänderungsverhalten mittels Schwindrinne, ihre mechanischen Eigenschaften, ihr Hydratationsverhalten und ihre Gefügeentwicklung hin untersucht. Diese Ergebnisse werden einander gegenübergestellt und ausgewertet, um als Resultat eine optimale Konfektionierung für ein volumenstabiles Bindemittelsystem zu erhalten. Die genauen Probenbezeichnungen der Hauptuntersuchungen sind zusätzlich im Anhang 1 dargestellt.

3. Experimentelle Untersuchungen

Hauptuntersuchungen -Vergleich der Bindemittelcompounds mit dem Referenz-/Standardcompound

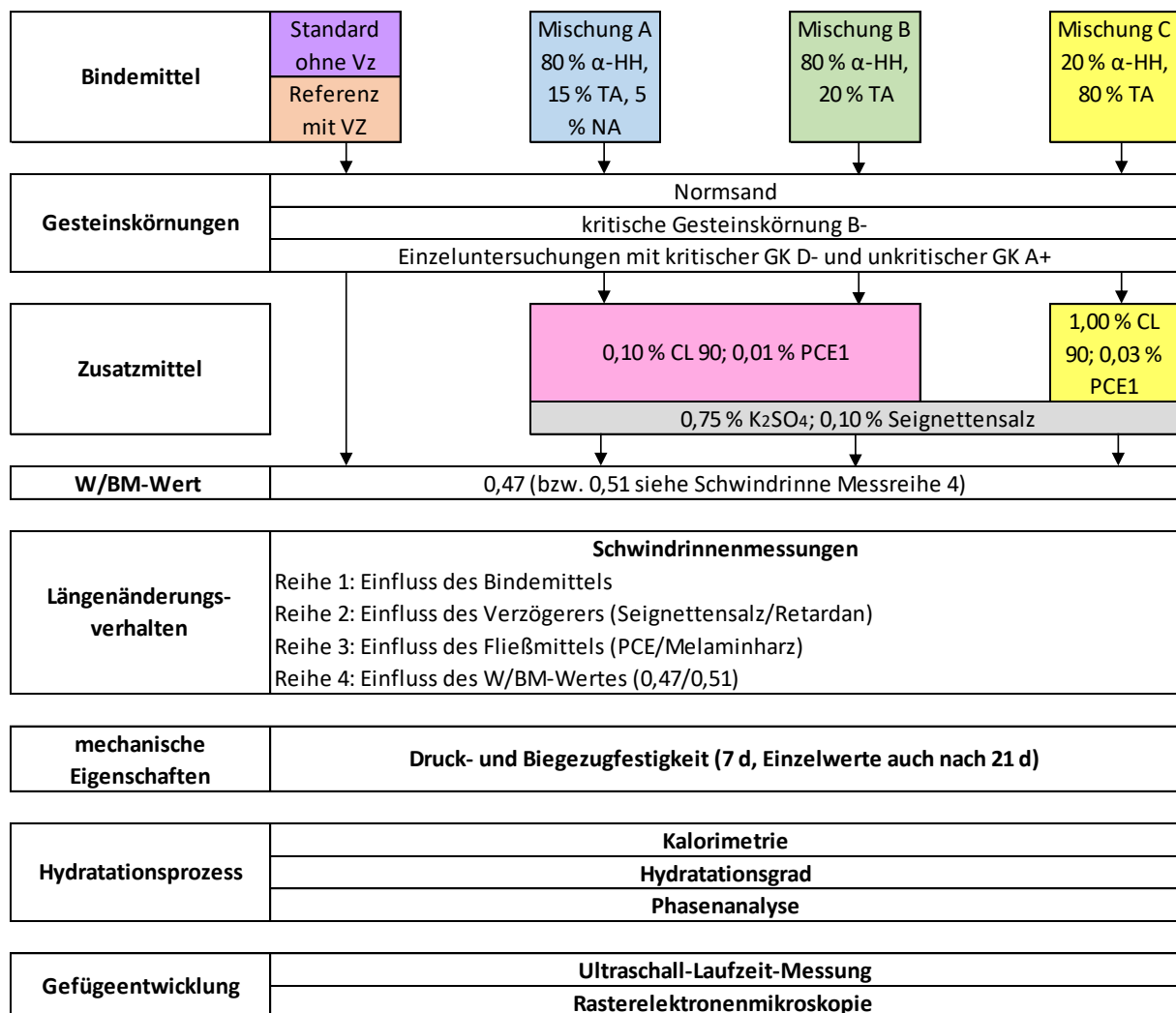


Abbildung 7: Hauptuntersuchungen - Vergleich der Bindemittelcompounds mit dem Referenz-/ Standardcompound zur Herstellung eines volumenstabilen Fließestrichs

3.4.1. Längenänderungsmessung mittels Schwindrinne

Die Längenänderungsmessung erfolgt in speziellen Schwindrinnen, welche am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde entwickelt wurden. Mit diesen ist eine online-Erfassung der Längen-änderung kontinuierlich möglich [7].

Der Mörtel aus 280 g Bindemittel und 520 g Gesteinskörnung wird mit einem einheitlichen W/B-Wert von 0,47 und dem vorgegebenen Fließmaß von 240 mm \pm 10 nach dem im 3.3. aufgeführten Mischregime gemischt. Vorab werden die Zusatzmittel den jeweiligen Bindemitteln zugegeben und unter 2-minütigem Rühren homogenisiert. Dem Referenz-/Standard-Estrichcompound wurden bereits werksintern Zusatzmittel hinzugeben. Neben dem Normsand werden auch die Mörtel mit den Sanden B - und D - und vereinzelt mit dem Sand

3. Experimentelle Untersuchungen

A + untersucht.

Die Schwindrinnen bestehen aus einem mehrteiligen Stahlelement mit je zwei abnehmbaren Seitenteilen und Stirnseiten. Eine Stirnseite besteht aus einem Kunststoffblock, in welchem sich die Tastspitze eines Wegaufnehmers befindet. Durch zwei Schrauben, welche sich auf den Stirnseiten befinden und in die Innenseite der Schwindrinne hineinragen, wird eine optimale Kraftübertragung zwischen Probekörper und Stirnseite gewährleistet. Innerhalb der Schwindrinne befindet sich eine Hartplastik U-Form, welche auf vier Rollen aufliegt, um ein Gleiten zu ermöglichen. Darin befinden sich wiederum zwei Plastikfolien, in diese das Prüfmaterial gegossen wird. Auf den Stirnseiten befinden sich in der Kontaktzone zu der Hartplastik-U-Form selbstklebende Kunststoffstreifen. Die Probekörperabmessungen betragen $40 \times 40 \times 250 \text{ mm}^3$.



Abbildung 8: Längenänderungsmessung mittels Schwindrinne

Die Stirnseite mit dem Wegaufnehmer wird während des Einfüllvorgangs mit einem Stift fixiert, um ein vorzeitiges Verschieben zu vermeiden. Zudem werden die Kunststoffstreifen der Stirnseiten eingefettet, um die spätere Reinigung zu vereinfachen. Der Messvorgang wird vor dem Mischvorgang des Mörtels gestartet und erfolgt bei Normklima.

Unmittelbar nachdem der Mörtel hergestellt wurde, wird dieser mithilfe eines Spatels in eine der drei Schwindrinnen gefüllt. Die Mörtelmasse wird bis zu einer Höhe von 40 mm gefüllt, welche vorab auf der Stirnseite markiert wurde. Anschließend wird der Mörtel mit dem Spatel mittels Stochern verdichtet. Es wird eine Kunststoffolie auf die Mörtelmasse gelegt, um die Austrocknung zu behindern und somit die schlechtesten Bedingungen zu simulieren. Zuletzt wird der Stift zur Fixierung des Wegaufnehmers entfernt und die Zeit, welche der Nullzeit entspricht, notiert. Die Messdauer der Längenänderung beträgt jeweils eine Woche.

Die folgende Tabelle stellt die Messreihen mit dem jeweiligen Untersuchungsschwerpunkt dar.

3. Experimentelle Untersuchungen

Tabelle 16: Messreihen der Längenänderungsmessungen in der Schwindrinne

Messreihe	Schwerpunkt	Probenbezeichnung	Compound	Gesteinskörnung
1a	Einfluss des Bindemittels	- Sta (NS) 0,47 - A (NS) 0,47 - B (NS) 0,47 - C (NS) 0,47	- Standard - A - B - C	- Normsand
1b	Siehe 1a	- Sta (B-) 0,47 - A (B-) 0,47 - B (B-) 0,47 - C (B-) 0,47	Siehe 1a	- B -
1c	Siehe 1a	- Sta (D-) 0,47 - A (D-) 0,47 - B (D-) 0,47 - C (D-) 0,47	Siehe 1a	- D -
1d	Siehe 1a	- Sta (A+) 0,47 - B (A+) 0,47	- Standard - B	- A +
2	Einfluss des Verzögerers (Verwendung von Retardan statt Seignettensalz)	- A (B-) 0,47 Ret 05 - B (B-) 0,47 Ret 05 - B (D-) 0,47 Ret 05	- A - B (Vorzugscompounds aus Messreihe 1)	- B - - D -
3	Einfluss des Fließmittels (Verwendung von Melaminharz statt PCE)	- A (B-) 0,47 Mela 10 - B(B-) 0,47 Mela 10 - B(D-) 0,47 Mela 10	Siehe 2	Siehe 2
4	Einfluss des W/B-Wertes	- Sta (B-) 0,51 - B (B-) 0,51 - B (D-) 0,51	- Standard - B	Siehe 2

Aus zeitlichen Gründen war es nicht möglich, jede Messreihe an allen Compounds und Gesteinskörnungen durchzuführen. Lediglich die Messreihe 1, durch die der Einfluss des Bindemittels untersucht werden soll, wird an einer Vielzahl der möglichen Mörtelkombination vorgenommen. Für die Messreihen 2 - 3 werden vereinzelt Messungen an den Compounds A

3. Experimentelle Untersuchungen

und B und für die Reihe 4 auch am Standardcompound durchgeführt.

Alle Mörtelproben der Abbildung 9 werden mit Normsand und einem W/B-Wert von 0,47 und einem Fließmaß von 240 mm \pm 10 hergestellt. Folgende Zusatzmitteldosierungen werden für die eigens hergestellten BM angewendet:

- 0,10 % Seignettensalz
- 0,75 % Kaliumsulfat
- 0,10 % CL 90 (1,00 % bei Probe C)
- 0,01 % PCE1 (0,03 % bei Probe C)

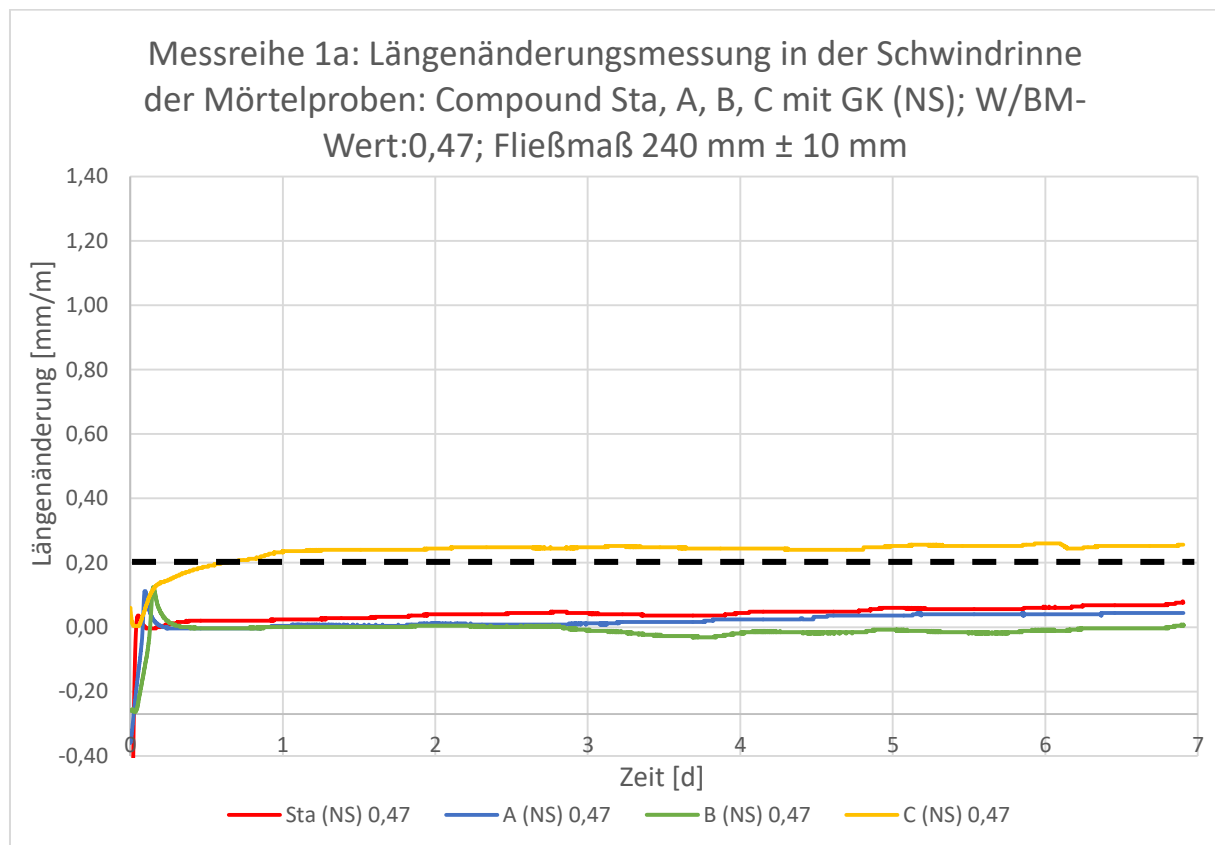


Abbildung 9: Messreihe 1a: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK Normsand; W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm \pm 10 mm

Es wird der Einfluss der jeweiligen Bindemittel untersucht. Entscheidend ist der Kurvenverlauf nach dem Ende des Schwindens innerhalb der ersten Stunden. Dieser Punkt entspricht dem Wert 0, dementsprechend werden die jeweiligen Kurven angeordnet. Ab dieser Stelle wird die Längenänderung berücksichtigt, da diese nun im erhärteten Mörtel

3. Experimentelle Untersuchungen

stattfindet und bauteil-schädigend ist.

Bei der Standardprobe ist innerhalb der ersten Stunden ein leichter Anstieg der Längenänderungskurve bis zum Zeitpunkt $t = 8 \text{ h}$ festzustellen. Erst nach etwa 24 h steigt sie erneut an, aber mit einer viel geringeren Steigung, der Versteifungsprozess ist zu diesem Zeitpunkt bereits fortschreitend. Bei der Probe mit dem Compound A ist allerdings kein verstärkter Anstieg der Längenänderung innerhalb der ersten 8 h festzustellen, diese steigt erst nach 3 d leicht und kontinuierlich an.

Bei der Probe mit dem Compound B ist erst nach knapp 3 d eine Zunahme einer negativen Längenänderung festzustellen. Nach knapp 4 d steigt der Kurvenverlauf wieder an, sodass nach 7 d zwar keine Längenänderung festgestellt werden konnte, allerdings wäre bei einer längeren Messdauer ein geringer Anstieg der Längenänderung zu erwarten, welcher aber vermutlich noch im Toleranzbereich von 0,20 mm/m läge.

Am auffälligsten ist der Kurvenverlauf der Probe mit dem Compound C, welche keine Volumenexpansion mit anschließender Volumenabnahme innerhalb der ersten Stunde im noch plastischen Zustand aufweist. Nach einem kurzen Schwindprozess setzt eine Volumenexpansion ein, die exponentiell bis zu einer Dauer von 1 d zunimmt. Bis zum zweiten Tag steigt diese nur noch linear und sehr gering an, der Verfestigungsprozess ist nun auch bei der anhydritreichen Probe in einem fortschreitenden Stadium. Bis zum Ende der Messdauer verändert sich die Längenänderung dieser Probe nicht mehr.

Die höchste Längenänderung weist die Probe C mit 0,26 mm/m auf und übersteigt den Toleranzwert somit knapp. Möglicherweise könnten die DH-Kristalle aus der Anhydritkomponente auf die bereits gebildeten DH-Kristalle aus der α -HH Komponente drücken. Dies wurde allerdings noch nicht genauer untersucht, sodass es sich dabei nur um eine Hypothese handelt.

Anschließend folgt die Standardprobe mit 0,08 mm/m. Probe A weist einen Wert von 0,05 mm/m und Probe B von 0,01 mm/m auf. Somit liegen die Proben Sta, A und B in Verbindung mit Normsand im Toleranzbereich.

Alle Mörtelproben der nachfolgenden Abbildung 10 werden mit der Gesteinskörnung B -, einem W/B-Wert von 0,47 und einem Fließmaß von $240 \text{ mm} \pm 10$ hergestellt. Folgende Zusatz-mitteldosierungen werden für die eigens hergestellten BM angewendet:

- 0,10 % Seignettensalz
- 0,75 % Kaliumsulfat
- 0,10 % CL 90 (1,00 % bei Probe C)
- 0,01 % PCE1 (0,03 % bei Probe C)

3. Experimentelle Untersuchungen

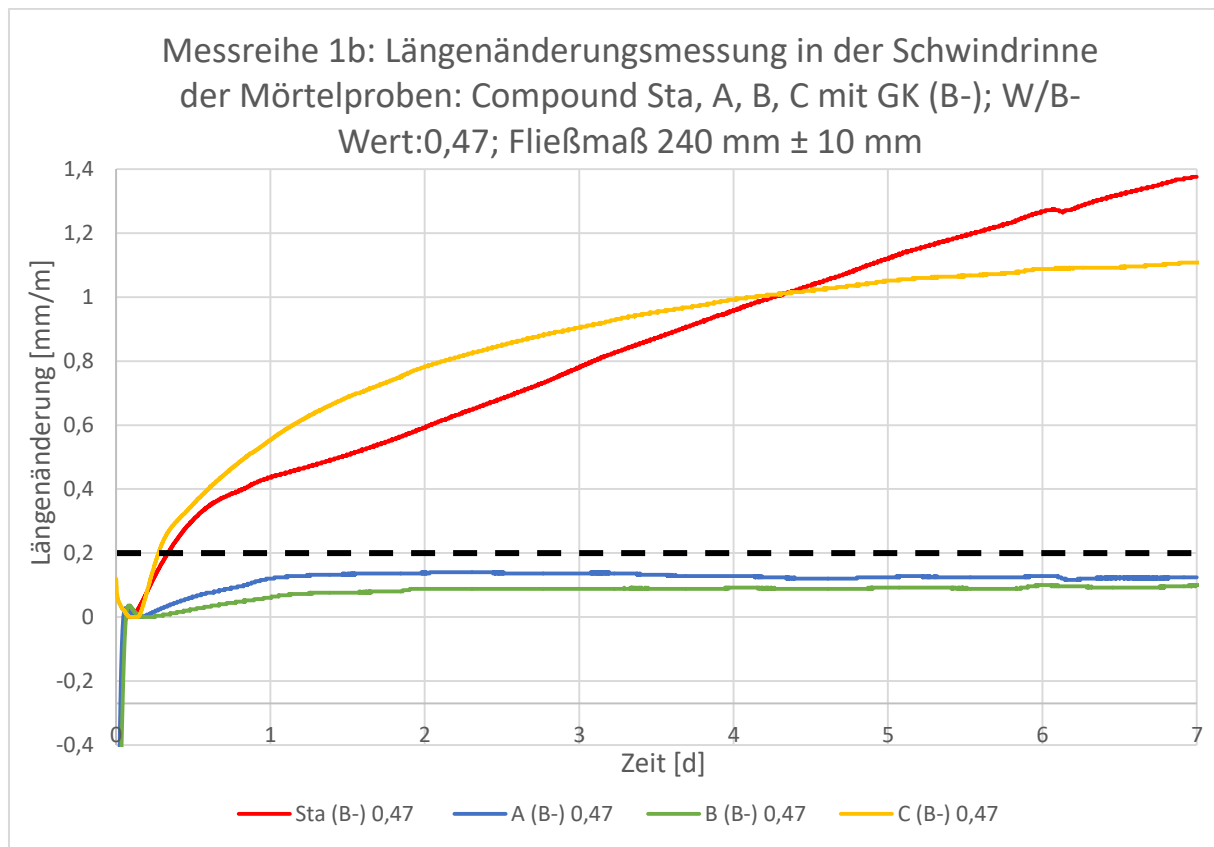


Abbildung 10: Messreihe 1b: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (B-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm \pm 10 mm

An dieser Messreihe wird ebenfalls der Einfluss der Bindemittel untersucht. Auffällig ist die starke Zunahme der Längenänderung bei der Standardprobe. Nach etwa 4 h steigt diese erst exponentiell und nach 14 h linear an. Nach 7 d nähert sie sich keinem Wert an. Aus Zeitgründen war eine längere Messdauer nicht möglich, es wäre aber anzunehmen, dass die Längenänderung mit der Zeit noch weiter angestiegen wäre.

Probe C weist ebenfalls einen exponentiellen Anstieg innerhalb der ersten 12 h auf, dieser flacht aber immer weiter ab und nähert sich einem Wert an, welcher allerdings nach 7 d noch nicht erreicht ist.

Die Kurvenverläufe der Proben A und B sind, abgesehen von dem steileren Anstieg der Längenänderung der Probe A innerhalb der ersten 24 h, nahezu identisch. Bereits nach einem Tag steigen die Kurven nicht mehr bzw. nur noch minimal weiter an und nähern sich bereits einem Wert an.

Der stärkere Anstieg der Probe A könnte auf den DH Gehalt des NA zurückzuführen sein, da die DH-Kristalle, den Hydratationsprozess beschleunigen und somit auch die Längenzunahme durch die schnelle Kristallbildung intensivieren. Um dieser Hypothese nachzugehen, bedarf es allerdings weitere Untersuchungen bezüglich des

3. Experimentelle Untersuchungen

Erstarrungsbeginns. Sinnvoll wäre es Proben mit dem Compound B (kein NA-Anteil) zu untersuchen, um den Einfluss des NA näher beurteilen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit war dies allerdings nicht möglich.

Die Standardprobe erreicht die höchste Längenänderung mit 1,4 mm/m, Probe C erreicht einen Wert von 1,1 mm/m, Probe A von 0,12 mm/m und Probe B von 0,09 mm/m. Somit halten nur die Proben A und B die Normtoleranz von 0,20 mm/m ein.

An dieser Stelle wird zudem deutlich, dass die Volumenexpansion der Standardprobe nicht primär am BM liegen kann, da ansonsten bei den Compounds A und B, durch die vergleichbare BM-Rezeptur, ähnliche Volumenexpansionen hätten festgestellt werden müssen. Folglich müsste die Additivzusammensetzung des Standardcompounds für die Expansion verantwortlich sein.

Alle Mörtelproben der Abbildung 11 werden mit der Gesteinskörnung D -, einem W/B-Wert von 0,47 und einem Fließmaß von 240 mm \pm 10 hergestellt. Folgende Zusatzmitteldosierungen werden für die eigens hergestellten BM angewendet:

- 0,10 % Seignettensalz
- 0,75 % Kaliumsulfat
- 0,10 % CL 90 (1,00 % bei Probe C)
- 0,01 % PCE1 (0,03 % bei Probe C)

3. Experimentelle Untersuchungen

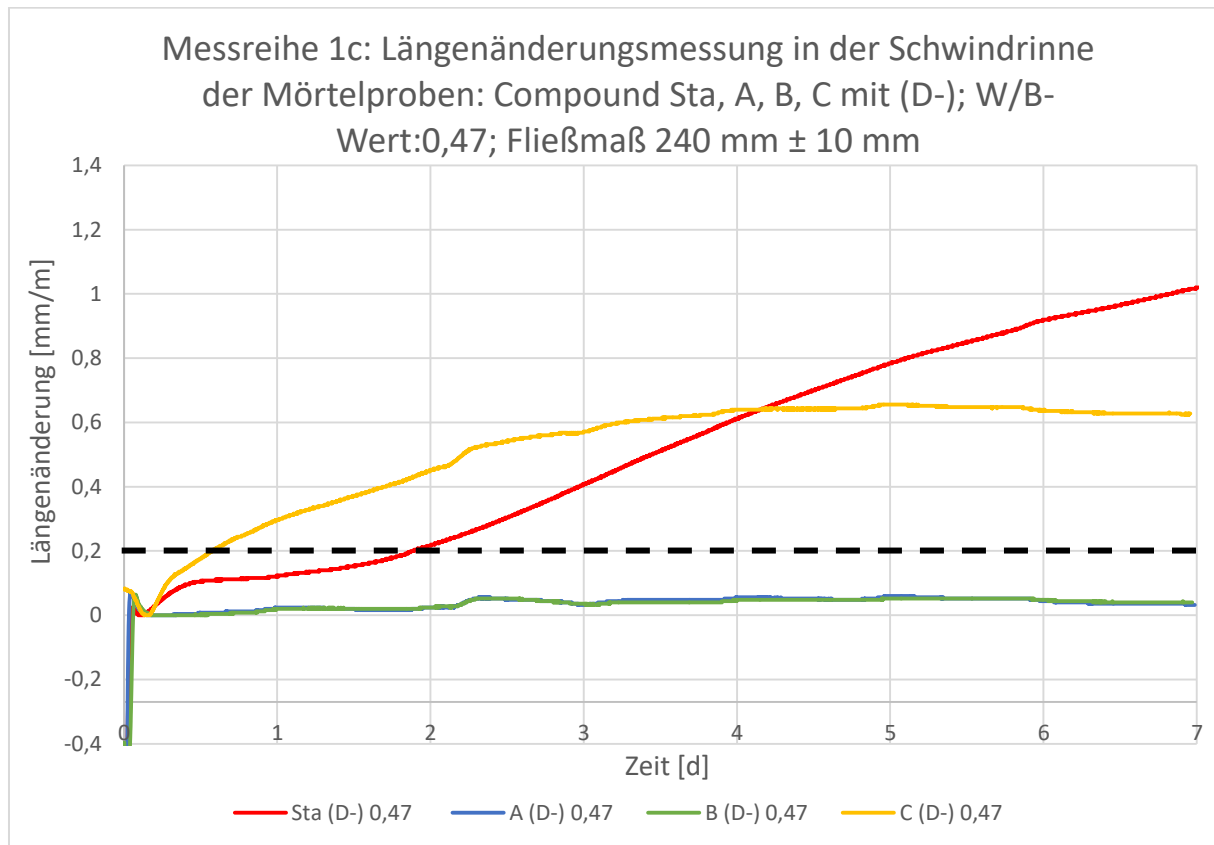


Abbildung 11: Messreihe 1c: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm \pm 10 mm

An dieser Messreihe wird ebenfalls der Einfluss der Bindemittel untersucht. Die Kurvenverläufe unterscheiden sich nur quantitativ, aber nicht qualitativ von den Ergebnissen aus Messreihe 1b. Allerdings sind die Kurven der Mörtelproben mit den Compounds A und B nahezu deckungsgleich und die Probe A weist keine erhöhte Längenänderung zu Probe B mehr auf.

Ein geringer Anstieg der Kurven der Proben A, B und C nach etwa 2,25 d ist vermutlich klimabedingt entstanden und wird nicht berücksichtigt. Da die Standardprobe, welche während eines anderen Messzyklus untersucht wurde, diesen Anstieg nicht aufweist, liegt diese Vermutung nahe.

Der exponentielle Anstieg der Standardprobe und der Probe C, der bei der Reihe 1b in Verbindung mit der GK B - festzustellen ist, fällt bei der Reihe 1c in Verbindung mit der GK D - deutlich kürzer und flacher aus. Nach etwa 8 h steigt die Kurve der Probe C nur noch linear an, ab dem 4. Tag nähert sie sich bereits einem Wert an. Die Standardprobe hingegen weist zwischen 12 h und 24 h keine Längenzunahme auf und beginnt erst danach wieder zu expandieren. Ab dem 2. Tag erhöht sich die Steigung der Zunahme sogar, sodass sich die Probe nach 7 Tagen noch keinem Wert angenähert hat.

Alle Proben weisen eine verringerte Längenänderung nach 7 d im Vergleich zur Reihe 1b mit der GK B - auf. Probe A und B erreichen eine normgerechte Längenänderung von 0,03

3. Experimentelle Untersuchungen

mm/m, Probe C erreicht einen Wert von 0,62 mm/m und die Standardprobe von 1,02 mm/m.

Zusammenfassend löst die Gesteinskörnung D - niedrigere Längenzunahmen aus und geht somit weniger volumenexpansive Reaktionen mit dem Bindemittel, bzw. den verwendeten Zusatzmitteln ein als die Gesteinskörnung B -. Zudem wirkt sich der NA-Anteil der Probe mit dem Compound bei der GK D - nicht nachteilig auf das Längenänderungsverhalten aus, da die Probe mit dieser GK identische Ergebnisse erzielt wie die Probe mit dem Compound B (kein NA-Anteil). Bei der GK B - hingegen erzielt die Probe B ohne NA Anteil eine geringere Längenzunahme.

Zudem weisen die bisherigen Ergebnisse der Messreihe 1 darauf hin, dass das Bindemittel des Standardcompounds weniger entscheidend für die volumenexpansive Reaktion ist, als die verwendeten Zusatzmittel. Das Bindemittel des Standardcompounds ist vergleichbar mit den Bindemittelmischungen A und B, da der Gehalt an α -HH bei diesen Proben bei 80 % und der A II-Gehalt bei 20 % liegt. Die Standardprobe erreicht die 10-fachen Längenänderungswerte in Verbindung mit der Gesteinskörnung B - und D - im Vergleich zu den Proben mit den Compounds A und B. Es liegt somit nahe, dass der entscheidende Faktor an dieser Stelle die Zusatzmittel sind.

Die Werte des nachfolgenden Diagramms stammen aus dem vorangegangenen wissenschaftlichen Kolleg [24]. Alle Mörtelproben der Abbildung 12 wurden mit dem Referenzcompound und allen GK, einem W/B-Wert von 0,38/0,41 und einem Fließmaß von 220 mm \pm 10 hergestellt. Aufgrund des abweichenden Fließmaßes dienen die Ergebnisse nur zur Orientierung und sind nicht unmittelbar mit den Ergebnissen dieser Arbeit zu vergleichen.

3. Experimentelle Untersuchungen

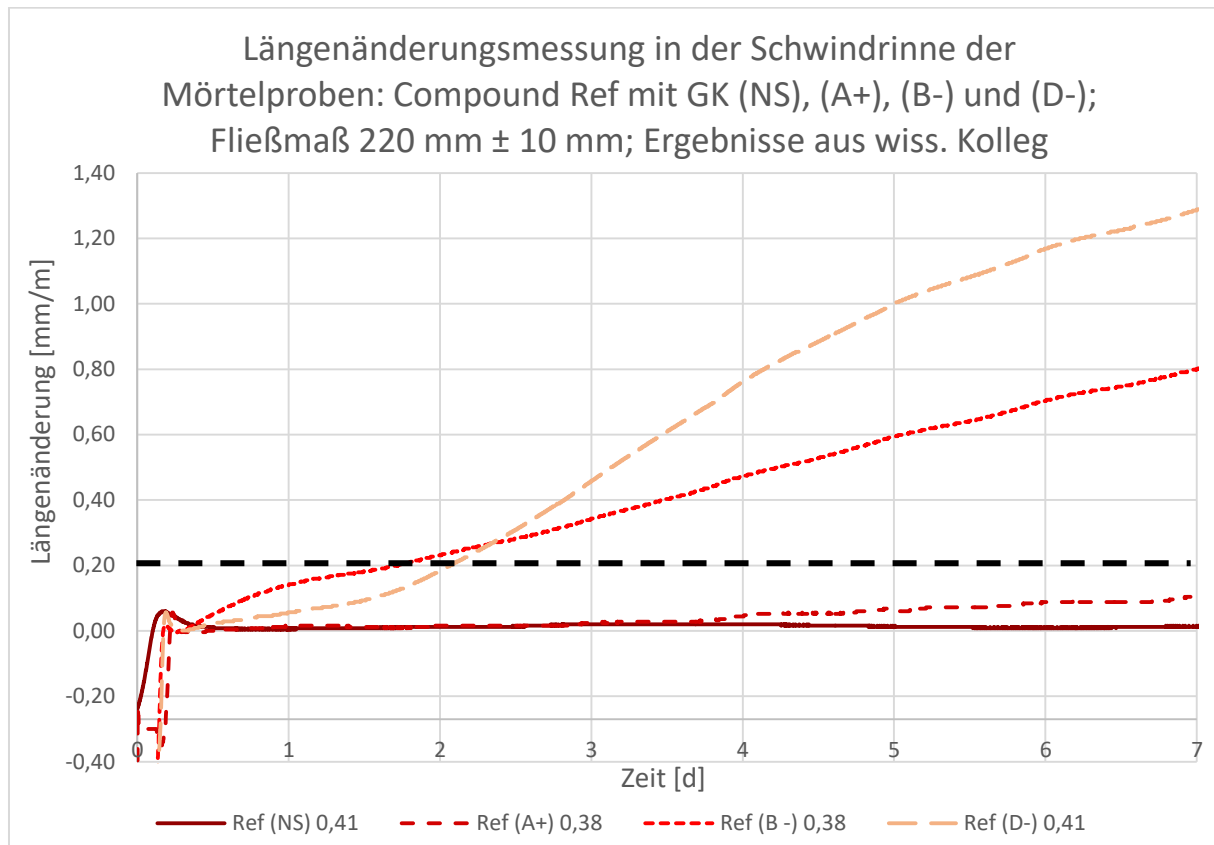


Abbildung 12: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Ref mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); Fließmaß 220 mm \pm 10 mm; Ergebnisse aus wiss. Kolleg [24]

Im Vergleich zu den bisherigen Ergebnissen fällt auf, dass die Probe mit der GK D- beim Referenzcompound die höchste Längenänderung nach 7 d mit 1,28 mm/m erreicht. Die Kurve steigt bis zum Zeitpunkt $t = 1,75$ d flach an und anschließend mit einer höheren Steigung und scheint erst nach 6 d allmählich abzuflachen. Zwar steigt zu einem ähnlichen Zeitpunkt die Kurve der entsprechenden Probe mit dem Standardcompound (ohne Verzögerer) ebenfalls leicht an, aber in einer viel geringeren Intensität (siehe Abbildung 13). Die Referenzprobe mit der GK B - erreicht eine Längenänderung von 0,80 mm/m nach 7 d. Im Gegensatz zur Probe mit der GK D -, ist zuerst der steilere Anstieg bis zum Zeitpunkt $t = 1$ d zu verzeichnen, anschließend flacht die Kurve leicht ab, aber steigt während der gesamten Messdauer linear und nähert sich keinem Wert an. Bei der entsprechenden Standardprobe ist der Anstieg innerhalb 1 d intensiver.

Die Probe mit der GK A + erreicht eine Längenzunahme von 0,10 mm/m und liegt somit noch im Toleranzbereich, allerdings ist die Zunahme nach 7 d noch nicht abgeschlossen, denkbar wäre ein Überschreiten der Toleranz bei einer längeren Messdauer. Vergleichbar ist dieses Ergebnis mit der entsprechenden Standardprobe.

Bei der Probe mit dem Referenzcompound in Verbindung mit dem Normsand sind keine Längenänderung nach 7 d festzustellen, wohingegen die entsprechende Standardprobe selbst mit NS geringe Längenzunahmen aufweist, welche aber noch im Toleranzbereich

3. Experimentelle Untersuchungen

liegen.

Somit wird deutlich, dass der Verzögerer Einfluss auf die Längenänderung haben kann, allerdings ist dies von der Art der GK abhängig. Unter Verwendung der GK B - wirkt sich der Verzögerer in diesem Fall positiv auf die Längenänderung aus, bei der GK D - allerdings negativ. Um dieser Vermutung genauer nachgehen zu können, bedarf es weitere Untersuchungen mit dem Referenzcompound unter gleichen Bedingungen bezüglich der Frischmörtелеigenschaften, damit die Ergebnisse auch direkt mit denen des Standardcompounds verglichen werden können.

Zuletzt sollen die nachfolgenden Diagramme einen direkten Vergleich der Gesteinskörnungen aufzeigen. Sowohl die Ergebnisse des Standardcompounds als auch die des Compounds B sind in Verbindung mit allen Gesteinskörnungen und zusätzlich mit einer potentiell nicht volumenexpansiven GK (A +) dargestellt. Die Zusatzmitteldosierung des Compounds erfolgt entsprechenden der vorangegangenen Untersuchungen der Messreihe 1.

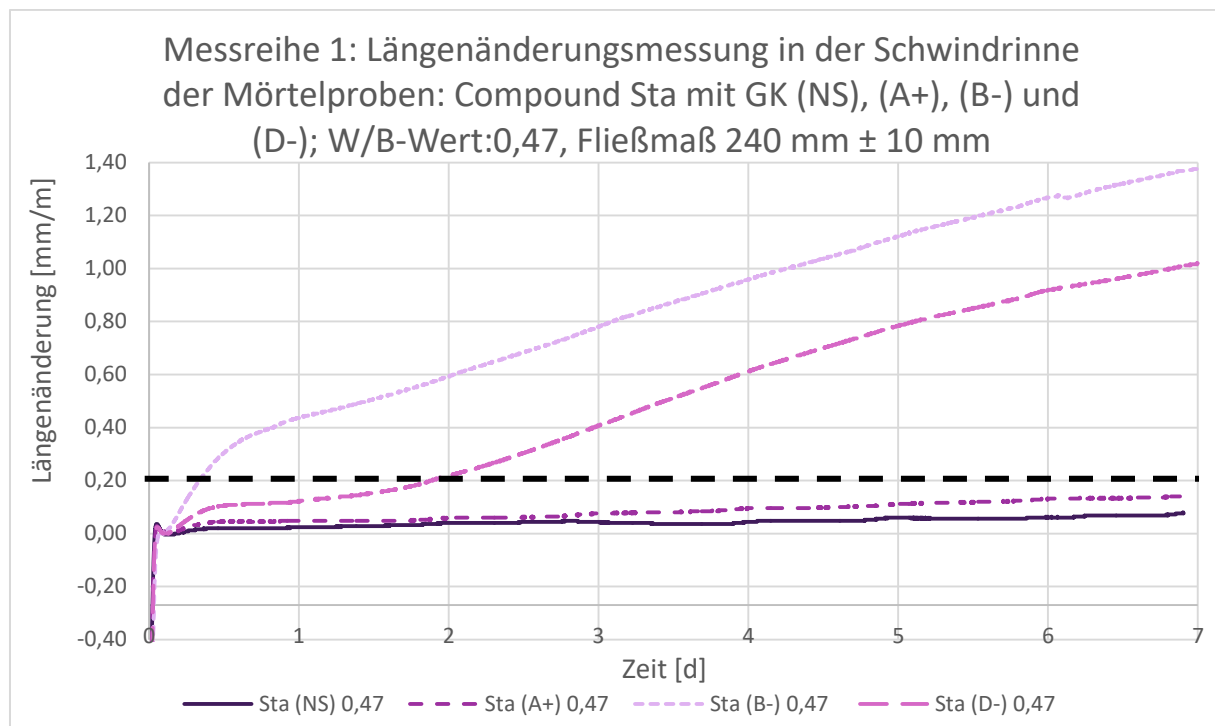


Abbildung 13: Messreihe 1: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm \pm 10 mm

3. Experimentelle Untersuchungen

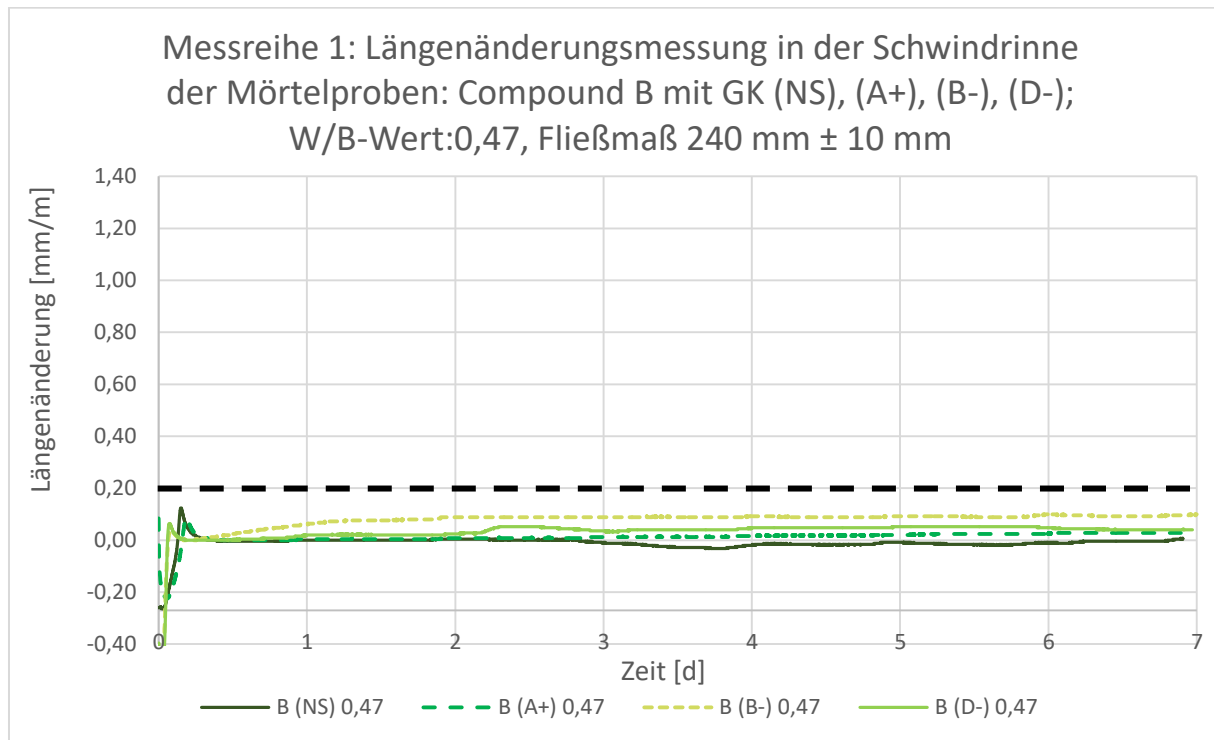


Abbildung 14: Messreihe 1: Längenänderungsmessung mittels Schwindrinne der Mörtelproben: Compound B mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm ± 10 mm

Unabhängig vom Bindemittel löst die Gesteinskörnung B - die höchste Längen-änderung aus, GK D - die zweithöchste, GK A + die dritthöchste und der Normsand löst die geringste Längen-änderung aus. Allerdings löst die GK B - in Verbindung mit dem Compound B nur eine Längenzunahme von 0,10 mm/m nach 7 d aus und liegt somit noch im Toleranzbereich, wohingegen beim Standardcompound die 14-fache Zunahme von 1,40 mm/m ausgelöst wird. Der Kurvenverlauf verdeutlicht zudem, dass die Volumenexpansion im Laufe der Zeit noch weiter zunehmen würde.

Qualitativ ist der Kurvenverlauf der Proben beider Compounds mit der GK D - identisch mit dem entsprechenden Verlauf der GK B -, in der Quantität unterschieden sie sich allerdings, da die GK D - etwas geringere Längenänderungswerte hervorbringt als die GK B -.

Die GK A + löst bei beiden Compounds eine sehr geringe Längenänderung aus, bei dem Standardcompound 0,15 mm/m und bei dem Compound B 0,03 mm/m, folglich liegen hier zwar beide Werte im Toleranzbereich, allerdings ist auch an dieser Stelle die Volumenexpansion des Standardcompounds größer als beim intern hergestellten Compound B. Selbst der Normsand verursacht eine geringe Längenänderung von 0,08 mm/m bei der Standardprobe, wohingegen beim Compound B keine Längenänderung zum Zeitpunkt 7 d festgestellt wird. Aufgrund des Schwindprozesses, der ab dem Tag 3 einsetzt, wäre hier ein längerer Messzeitraum sinnvoll, um eine gesicherte Aussage zu der Probe B mit Normsand treffen zu können.

3. Experimentelle Untersuchungen

Die Diagramme 13 und 14 verdeutlichen zusätzlich die Auswirkungen der unterschiedlichen Gesteinskörnungen auf den Standardcompound und den eigens hergestellten Compound B. Jede GK löst eine höhere Längenänderung bei der Standardprobe aus als bei Probe B. Die stärkste Volumenexpansion löst die GK B - aus, die zweitstärkste die GK D -, die drittstärkste die GK A + und die geringste der Normsand. Diese Reihenfolge ist bei beiden Compounds identisch.

Für die nachfolgenden Messreihen wird überwiegend mit dem bevorzugten Compound B gearbeitet. Dieser erreicht zwar nur leicht geringere Längenänderungswerte als der Compound A, erweist sich aber auch bei den Festigkeitswerten als die stabilere Mischung. Zum Vergleich wird vereinzelt noch der Standardcompound und der Compound A analysiert.

Durch Messreihe 2 soll der Einfluss des Verzögerers überprüft werden. Anstelle des Seignettensalzes (0,10 % bzgl. BM) wird Retardan (0,05 % bzgl. BM) verwendet. Die restlichen Zusatzmittel werden entsprechend Messreihe 1 dosiert.

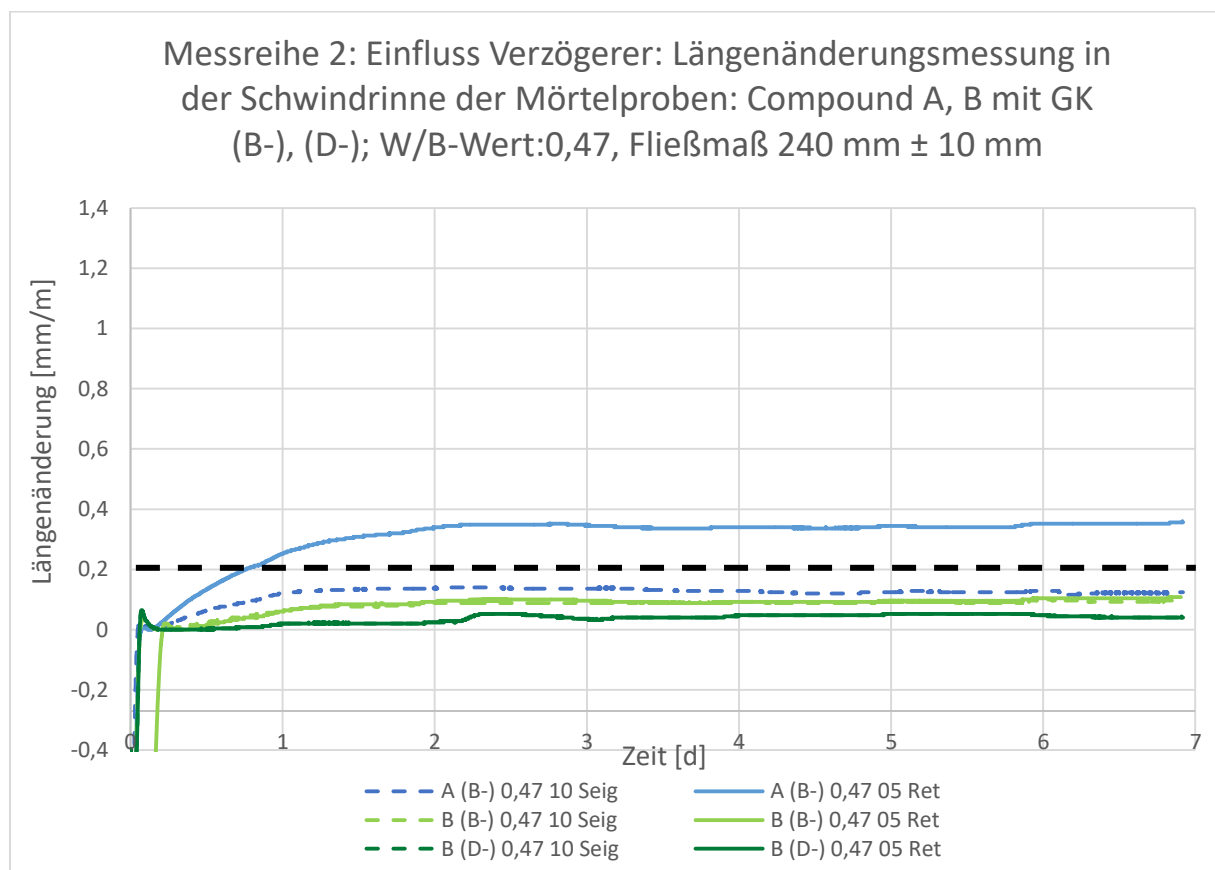


Abbildung 15: Messreihe 2: Einfluss Verzögerer: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound A, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm ± 10 mm

3. Experimentelle Untersuchungen

Das Diagramm 15 stellt die Längenänderung der Proben mit dem Compound B mit der Gesteinskörnung B - und D - und der Probe mit dem Compound A mit der Gesteinskörnung B - jeweils unter der Verwendung von Seignettensalz und Retardan dar.

Die Probe mit dem Compound A und mit der Gesteinskörnung B - und dem Retardan erreichen größere Längenänderungswerte als die entsprechende Probe mit dem Seignettensalz. Dabei nimmt die Längenänderung der Probe um das Dreifache zu (von 0,12 mm/m auf 0,36 mm/m).

Bei den Proben mit dem Compound B sind keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Verzögererart festzustellen, weder unter der Verwendung der GK B - noch bei der GK D -. Bei den Proben mit der GK D - sind die Kurvenverläufe beider VZ-Arten sogar deckungs-gleich.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Retardan primär in Verbindung mit dem BM zu einer volumenexpansiven Reaktion führen kann. Nur bei der Probe mit dem Compound A (Na-Anteil vorhanden) werden mit dem Retardan erhöhte Längenzunahmen festgestellt. Scheinbar scheint an dieser Stelle eine expansive Reaktion mit dem NA und dem Retardan stattzufinden. Die GK kann hier als primärer Reaktionspartner ausgeschlossen werden, da ansonsten bei der entsprechenden Probe mit dem Compound B in Verbindung mit dem Retardan vergleichbare, erhöhte Längenzunahmen hätten detektiert werden müssen. Bei diesen Proben war allerdings kein Einfluss auf die Längenzunahme in Abhängigkeit an die Verzögererart festzustellen.

Durch Messreihe 3 soll der Einfluss des Fließmittels überprüft werden. Anstelle des PCEs wird ein Melaminharz-Fließmittel verwendet. Vorab wird die benötigte Menge an Melaminharz mittels Fließmaßbestimmung (entsprechend Kapitel 3.3.1) ermittelt. Um eine Konsistenz von $240 \text{ mm} \pm 10$ einzustellen, werden 0,10 % Melaminharz bzgl. des Bindemittels benötigt. Alle anderen Zusatzmittel werden entsprechend Messreihe 1 dosiert.

3. Experimentelle Untersuchungen

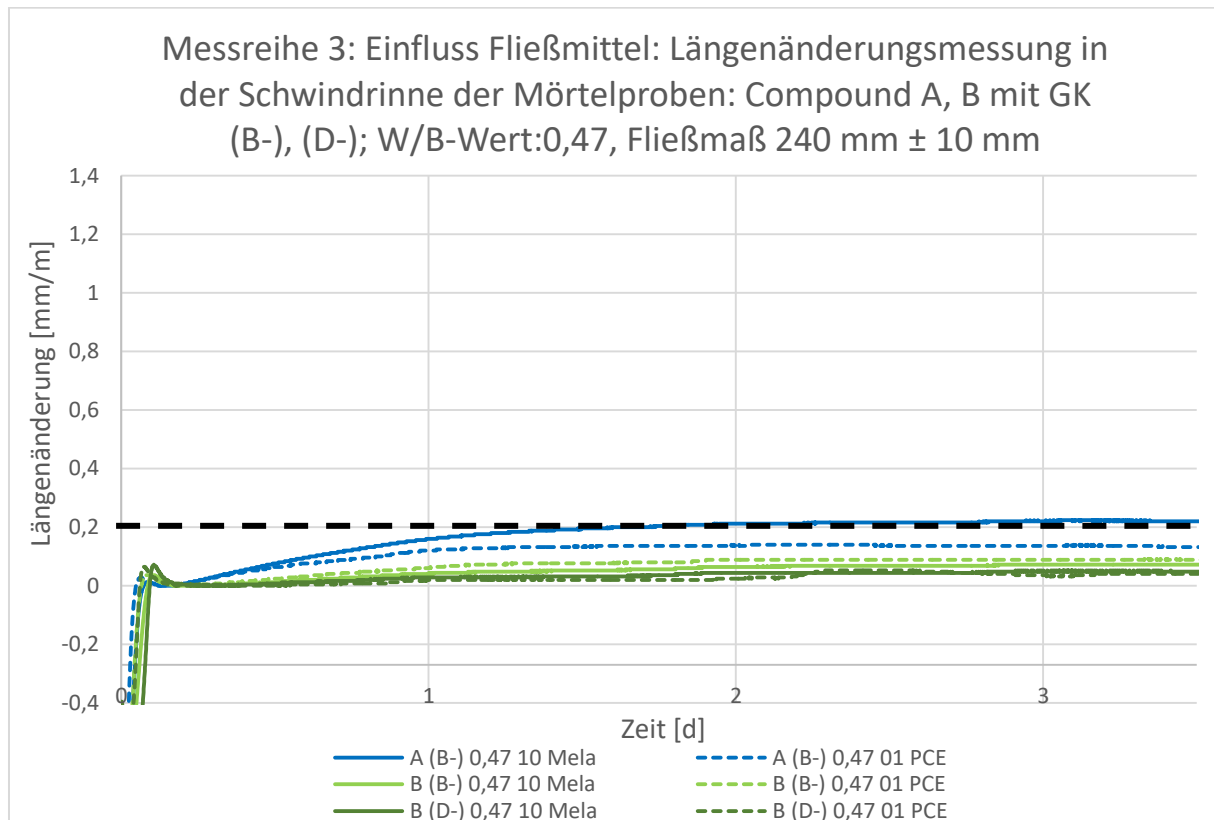


Abbildung 16: Messreihe 3: Einfluss Fließmittel: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound A, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; Fließmaß 240 mm \pm 10 mm

Untersucht werden die Compounds A und B in Verbindung mit der GK B - und GK D - (nur Compound B).

Das Melaminharz hat einen stärkeren Einfluss bei der Mörtelprobe mit dem Compound A (5% NA-Anteil) als bei den Proben mit dem Compound B (kein NA). Die Längenzunahme verdoppelt sich fast durch dieses Fließmittel im Vergleich zu der entsprechenden Probe mit dem PCE und übersteigt so den Toleranzbereich von 0,20 mm/m.

Bei den Proben mit dem Compound B ist der Einfluss viel geringer. In Verbindung mit der GK B - verringert sich die Längenänderung minimal von 0,09 mm/m auf 0,07 mm/m. Bei der Probe mit der GK D - erreicht das Prisma mit dem PCE zwar eine geringere Längenänderung als das Prisma mit dem Melaminharz zum Zeitpunkt $t = 3,5$, allerdings schwanken die Kurven leicht, sodass man an dieser Stelle eine signifikante Differenz ausschließen kann.

Somit löst das Melaminharz nur bei den Mörtelproben mit dem Compound A einen signifikanten Einfluss bezüglich der Längenänderung aus. Scheinbar geht der im BM A enthaltene NA eine Reaktion mit dem Melaminharz ein, die zu einer Volumenexpansion führen könnte, ähnlich wie das Retardan aus der Messreihe 2.

Ferner könnte die kürzere verzögernde Wirkung des Melaminharzes im Vergleich zum PCE dazu führen, dass die heterogene primäre Keimbildung, ausgelöst durch den DH-Gehalt im

3. Experimentelle Untersuchungen

Compound A, nicht so intensiv verzögert wird wie durch das PCE. Die verstärkte Längenzunahme könnte daher aufgrund der intensiveren Kristallbildung erfolgen, die das Melaminharz im Vergleich zum PCE zulässt. Dieser Prozess findet beim Compound B durch das Fehlen der DH-Komponente nicht statt, folglich löst die Änderung des FM keinen vergleichbaren Einfluss aus. Denkbar wäre dies auch bei der entsprechenden Probe mit dem Retardan aus Messreihe 2. Da es sich hierbei nur um eine Hypothese handelt, bedarf es noch weitere Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich waren. Beispielsweise müsste der Compound A mit den anderen GK untersucht werden, um sicherzustellen, dass die GK hier nicht maßgeblich bei der volumenexpansiven Reaktion mit dem Melaminharz, bzw. dem Retardan beteiligt ist.

Durch Messreihe 4 soll der Einfluss des W/B-Wertes überprüft werden. Anstelle des W/B-Wertes von 0,47 wird noch der Wert 0,51 untersucht. Die Zusatzmittel werden entsprechend Messreihe 1 dosiert, um eine direkte Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Das Fließmaß von 240 mm \pm 10 mm wird folglich außer Acht gelassen, da eine einheitliche Zusatzmitteldosierung ausschlaggebender für die zu untersuchenden Mörtel Eigenschaften ist, als eine vergleichbare Konsistenz.

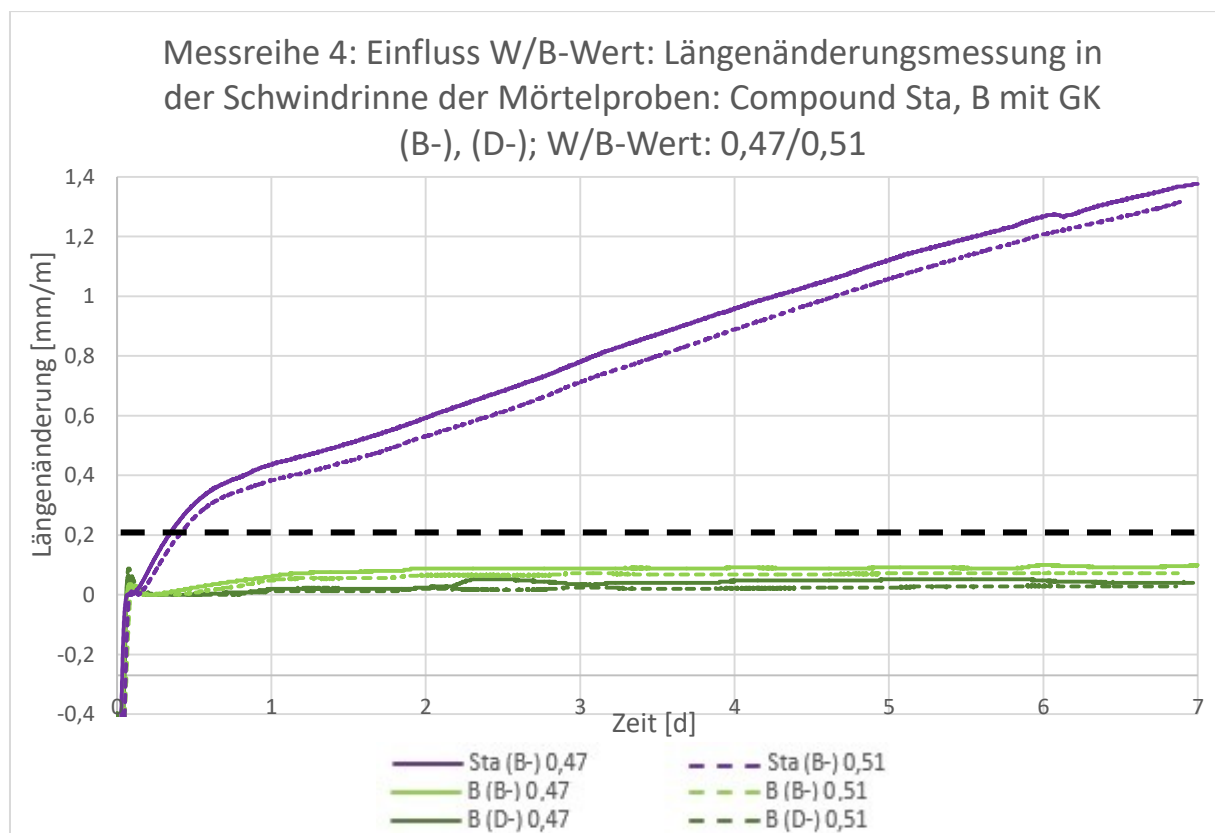


Abbildung 17: Messreihe 4: Einfluss W/B-Wert: Längenänderungsmessung in der Schwindrinne der Mörtelproben: Compound Sta, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47/0,51

Das Diagramm 17 macht den Unterschied zwischen verschiedener W/B-Werte der Mörtel

3. Experimentelle Untersuchungen

deutlich. Es wird neben dem Compound B auch der Standardcompound mit den kritischen Gesteinskörnungen B - und D - (nur Compound B) analysiert.

Alle untersuchten Proben erzielen geringere Längenänderungen bei einem W/B-Wert von 0,51 im Vergleich zu den Proben mit einem W/B-Wert von 0,47. Der Kurvenverlauf aller Proben ändert sich nur quantitativ in Folge des höheren W/B-Wertes.

Durch den erhöhten Wasseranteil im Mörtel wird der prozentuale Anteil des Compounds reduziert. Folglich steht eine verringerte Menge an potentiellen Reaktionspartnern für die Komponenten der Gesteinskörnung zur Verfügung, welche zusammen volumenexpansive Reaktionsprodukte hervorbringen. Der W/B-Wert ist in Folge dessen nur in einem indirekten Zusammenhang mit der Längenänderung zu bringen.

Zusammenfassend zeigen die Längenänderungsversuche in der Schwindrinne verschiedene Zusammenhänge und Einflüsse der jeweiligen Mörtelkomponenten bzgl. der Volumenexpansion auf.

Es wird deutlich, dass für die Längenzunahmen der Standard- und Referenzproben in Verbindung mit den GK B - und D -, primär die Additive verantwortlich sein könnten. Diese enthalten im Vergleich zu den eigens hergestellten Compounds Stabilisierer, welche einen Einfluss auf die Reaktionsmechanismen haben könnten. Denkbar wäre, dass der Stabilisierer die Reaktion zwischen Compound und GK verhindern könnte. Das Zusatzmittel soll eine optimale Konsistenz und eine minimale Entmischungsneigung erreichen, indem freies H₂O chemisches oder physikalisch eingebunden wird. Dieses freie H₂O ist vermutlich für die Reaktion zwischen Gesteinskörnung und Compound vonnöten, um eine schädigende Volumenexpansion zu vermeiden. Angenommen wird, dass bei der Referenzprobe dieses Wasser erst nach Beenden des plastischen Zustands durch das Nachlassen der Wirkung des Stabilisierers wieder zur Verfügung steht. Beim Compound B kann diese Reaktion bereits in diesem Zustand ablaufen, sodass nur Längenänderungen im Toleranzbereich erreicht werden und somit keine Bauschäden durch Volumenexpansion zu erwarten sind. Diese Hypothese bedarf allerdings noch weiterführende Untersuchungen, beispielsweise an der Referenz ohne Stabilisierer, um die Beteiligung dieses Zusatzmittels an der Volumenexpansion sicher nachzuweisen. Da die genaue Additivrezeptur des Referenz- und Standardcompound nicht bekannt sind, können ebenso andere Zusatzmittel an der Reaktion beteiligt sein.

Zudem werden Differenzen zwischen den einzelnen GK deutlich, welche nicht nur unterschiedlich starke Volumenexpansionen auslösen, sondern auch verschieden auf die Anwesenheit von Additiven reagieren.

Ergänzend zu diesen Ergebnissen werden die Gefügeentwicklung und der Hydratations-

3. Experimentelle Untersuchungen

prozess der Mörtel untersucht, um einen möglichen Zusammenhang dieser Eigenschaften zu überprüfen.

3.4.2. Hydratationsverhalten

Kalorimetrie

Durch die kalorimetrische Analyse lässt sich eine Aussage über den Hydrationswärmeverlauf während des Abbindens treffen. Dadurch lässt sich die Reaktivität und das Erhärtungsverhalten der CAF beurteilen.

Die Mörtel werden entsprechend 3.4.1 hergestellt. Insgesamt wird mit einer Feststoffmenge von 450 g gearbeitet, sodass 157,5 g Bindemittel und 292,5 g Gesteinskörnung für eine Probe verwendet werden. Bei den Leimproben wird 450 g Bindemittel verwendet. Die Zusatzmittel-dosierung erfolgt ebenfalls nach 3.4.1, Messreihe 1.

Die Proben werden in Kunststoffbehälter gefüllt und in eine isolierte Kammer gegeben. Anschließend wird eine Messsonde in die Probe eingeführt, welche die Temperatur innerhalb der Probe misst. Die Daten werden mittels einer entsprechenden Software aufgezeichnet und gespeichert. Diese rechnet die reinen Temperaturkurven in die entsprechenden Wärmeraten um.

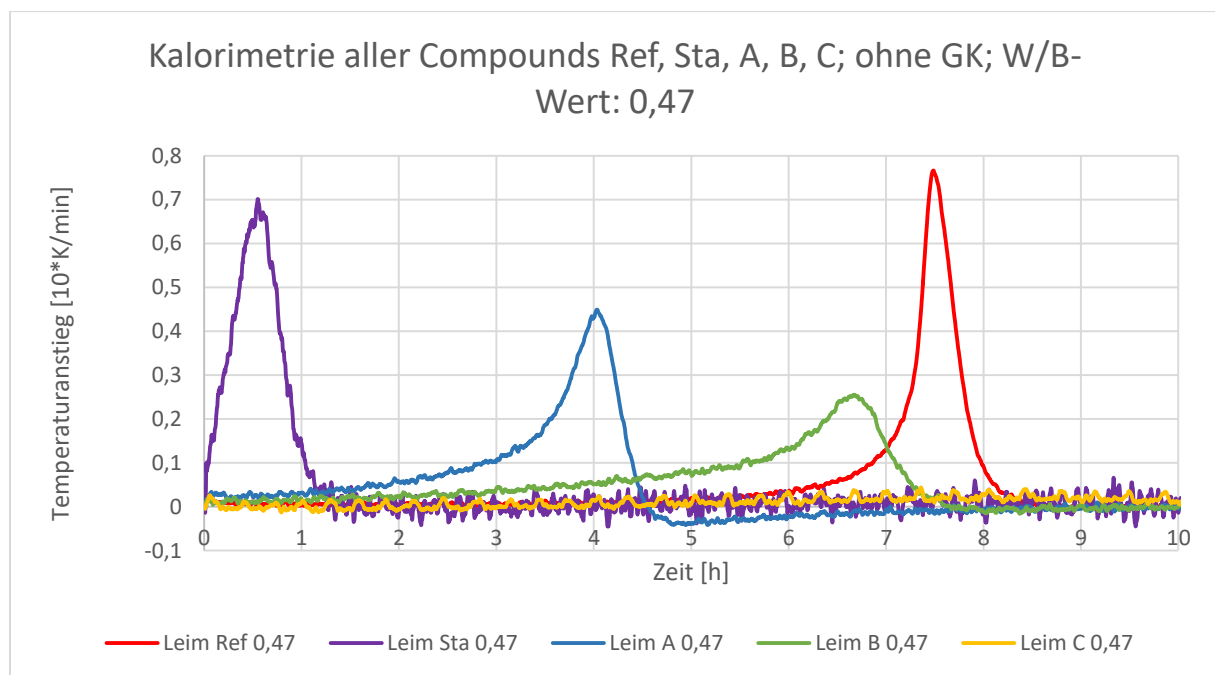


Abbildung 18: Kalorimetrie der Compounds Ref, A, B, C; ohne GK; W/B-Wert: 0,47

Die Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der Kalorimetrie-Untersuchungen der Compounds Sta, Ref, A, B und C ohne Gesteinskörnungen.

Der Abbindeprozess setzt bei der Standardprobe (ohne Verzögerer) am frühesten ein, nach etwa 30 min erreicht die Kurve ihr Maximum mit 7 K/min. Bereits nach 1,5 h sinkt die

3. Experimentelle Untersuchungen

Wärmerate auf 0. Der Anstieg erfolgt zudem direkt exponentiell, vergleichbar mit der Kurve der Referenzprobe (mit Verzögerer), allerdings weist diese eine Induktionsperiode von ca. 6 h auf, ehe der exponentielle Anstieg einsetzt. Dieser ist bei der Referenzprobe steiler, sodass der Peak spitzer ist. Die Kurve erreicht zudem ein höheres Maximum mit 7,75 K/min. Scheinbar scheint der Verzögerer nicht nur die Induktionsperiode zu verlängern, sondern auch für eine verstärkte Wärmeentwicklung zu sorgen.

Im Vergleich dazu erfolgt der Anstieg bei den Compounds A und B erst linear und anschließend exponentiell. Der lineare Kurvenanstieg dauert bei dem Compound A ca. 3,5 h, erst dann beginnt die exponentielle Zunahme bis zum Zeitpunkt 4 d, wo die Kurve ihren Höhepunkt bei 4 K/min erreicht. Nach knapp 5 h ist der Abbindeprozess bei der Probe A abgeschlossen. Aufgrund einer unzureichenden Messdauer fällt die Kurve der Wärmerate bei der Probe A in den negativen Bereich, eine längere Messdauer war im Rahmen der Masterarbeit allerdings nicht möglich. Normalerweise dürfte die Rate keine negativen Werte erzielen.

Der Kurvenverlauf der Probe B entspricht zwar qualitativ dem der Probe A, allerdings ist der Bereich der linearen Zunahme viel größer und ist erst nach 6 h beendet. Anschließend setzt ein flacherer exponentieller Anstieg ein und der Höhepunkt ist bei 2,5 K/min bei 6 h und 40 min erreicht. Der Abbindeprozess ist hier nach etwa 8 h abgeschlossen.

Im Gegensatz zu Probe B enthält Probe A einen Anteil von DH, diese wie bereits erläutert, beschleunigend wirken könnten. Folglich beginnt der Abbindeprozess des Compounds A und früher und verläuft zudem schneller.

Der Compound C, welcher zu 80 % aus TA besteht, weist nur eine minimale und extrem flache Zunahme der Wärmerate auf. Das α -HH hat aufgrund seiner hohen Reaktivität bei allen bisher beschriebenen Proben den schnellen und exponentiellen Anstieg der Wärmerate verursacht. Da es nur zu 20 % bzgl. des BM in der Probe C vorhanden ist, fehlt dieser Anstieg und es lässt sich lediglich der träge Abbindeprozess des Anhydrits erkennen, welcher auch nach 10 h noch nicht vollständig beendet ist. Aufgrund der extremen Flachheit der Kurve lässt sich dies aber nicht genau feststellen.

Im Vergleich dazu werden die Mörtelproben mit den Compounds Ref und B mit den Gesteins-körnungen Normsand, B - und D - auf ihre kalorimetrischen Eigenschaften hin untersucht. Der W/B-Wert beträgt 0,47 und die Zusatzmittel werden entsprechend der Messreihe 1 in Kapitel 3.4.1 dosiert.

3. Experimentelle Untersuchungen

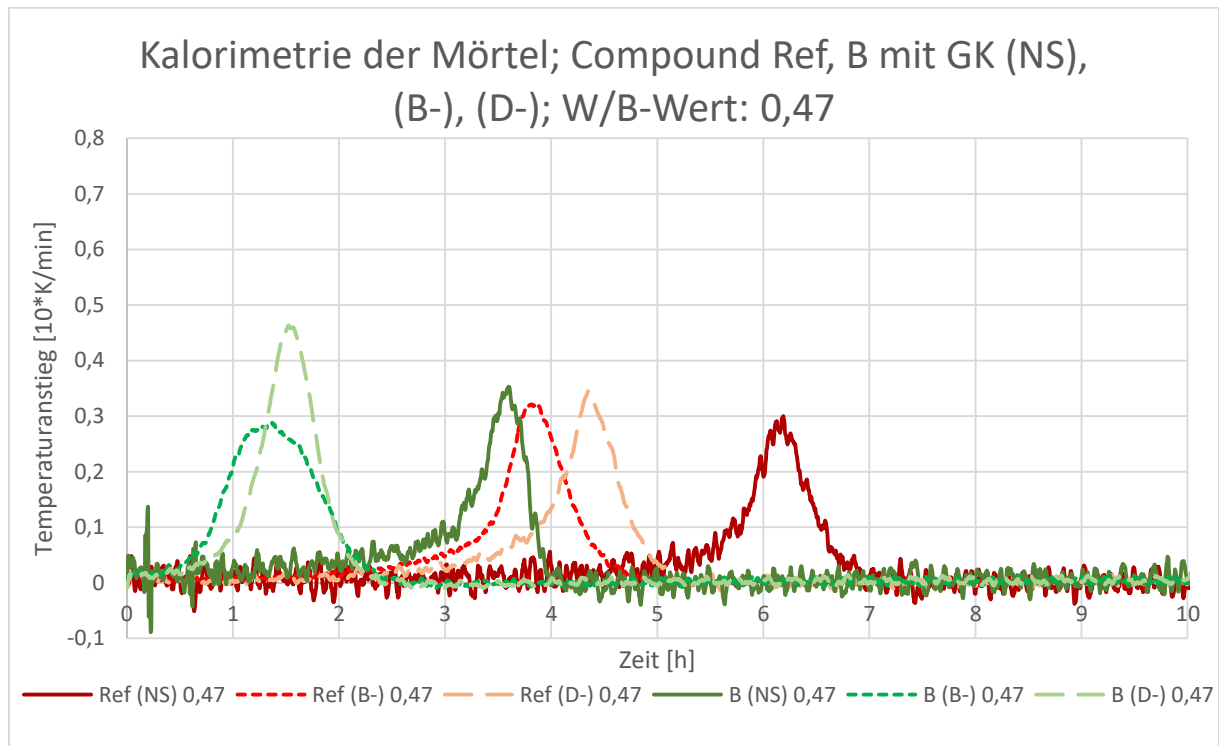


Abbildung 19: Kalorimetrie der Mörtel; Compound Ref, B mit GK (NS), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47

Auf den ersten Blick scheint es, als würden die Kurven der Referenz im Vergleich zu den Proben B um ca. 1,5 - 2,5 h verschoben sein. Doch es lassen sich vor allem bei der GK B und D - qualitative Unterschiede erkennen. Diese wirken sich primär auf die Induktionsperioden aus. Bei den Proben B (D-) und B (B-) verkürzt sich diese im Vergleich zur entsprechenden Normsandprobe von 1,5 h auf ca. 0,5 h. Anschließend setzt bei beiden Proben unmittelbar ein exponentieller Anstieg ein, welcher bei der Probe mit der GK D - steiler ist und mit 4,5 K/min ein höheres Maximum erreicht. Die Rate erreicht bei beiden Proben zum Zeitpunkt $T = 2,5$ h den Wert 0.

Die Induktionsperioden werden durch die GK B - und D - bei der Referenz im Vergleich zur Normsandprobe ebenfalls verkürzt und enden auch zu einem fast identischen Zeitpunkt bei $t = 1,5$, aber die Raten erreichen jeweils zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt ihre Maxima (bei der Probe GK B - : $t = 3,75$ h, bei der Probe GK D - : $t = 4,35$ h).

Auffällig ist bei diesen Kurven im Vergleich zu den entsprechenden Kurven bei den Proben mit dem Compound B, dass nach Ende der Induktionsperiode kein exponentieller Anstieg erfolgt, sondern erst ein linearer, welcher 1,75 h (Probe mit GK B -), bzw. 2,25 h (Probe mit GK D -) andauert. Erst dann setzt ein exponentieller Anstieg ein.

In Abhängigkeit an die GK unterscheiden sich auch die Verhältnisse der Maxima der Compounds untereinander. Die GK D - erzeugt mit dem Compound B den höchsten Peak, wohingegen die GK B - mit der Referenz mit einem Wert von 3,25 K/min den höchsten Wert erreicht.

3. Experimentelle Untersuchungen

Im Vergleich zu den Leimen ist auffällig, dass die maximalen Werte der Wärmeraten unterschiedlich in Abhängigkeit an das Compound beeinflusst werden. Bei der Leimprobe der Referenz wird der höchste Peak mit 7,75 K/min festgestellt, die Leimprobe B erreicht dagegen nur einen Wert von 2,5 K/min. Bei den entsprechenden Mörtelproben unter Verwendung von Normsand wird der maximale Wert der Wärmerate der Referenzprobe auf 3,0 K/min gesenkt, bei der Probe B hingegen auf 3,5 K/min gesteigert. Scheinbar finden beim Compound B in Verbindung mit den Gesteinskörnungen Reaktionsmechanismen statt, die zu einer erhöhten Wärmefreisetzung führen, trotz des reduzierten Bindemittelanteils durch die GK. Bei der Referenzprobe scheinen diese Reaktionen zu diesem Zeitpunkt nicht stattzufinden, dort scheint sich der gesenkte Anteil des Bindemittels durch die GK primär auf die Wärmerate auszuwirken.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Gesteinskörnungen für einen früheren Beginn der Hydratation durch das Verkürzen der Induktionsperiode verantwortlich sind. Die Hydratationsdauer wird in Verbindung mit den volumenexpansiven GK im Vergleich zum Normsand nicht signifikant beeinflusst. Es lassen sich zudem Unterschiede in Bezug auf die Entwicklung der Wärmerate zwischen dem eigens hergestellten Compound und dem Referenzcompound erkennen. Im Gegensatz zu den Proben mit dem Compound B ist bei der entsprechenden Referenz mit den GK B - und D - eine Phase des linearen Anstiegs zu verzeichnen. Ob dies gegebenenfalls auch einen Einfluss auf die Längenänderung hat, müsste in weiterführenden Untersuchungen geklärt werden.

Zuletzt werden die Mörtelproben mit den Compounds Ref und Sta mit den Gesteinskörnungen Normsand, B - und D - auf ihre kalorimetrischen Eigenschaften hin untersucht, um den Einfluss des Verzögerers zu analysieren. Der W/B-Wert beträgt 0,47.

3. Experimentelle Untersuchungen

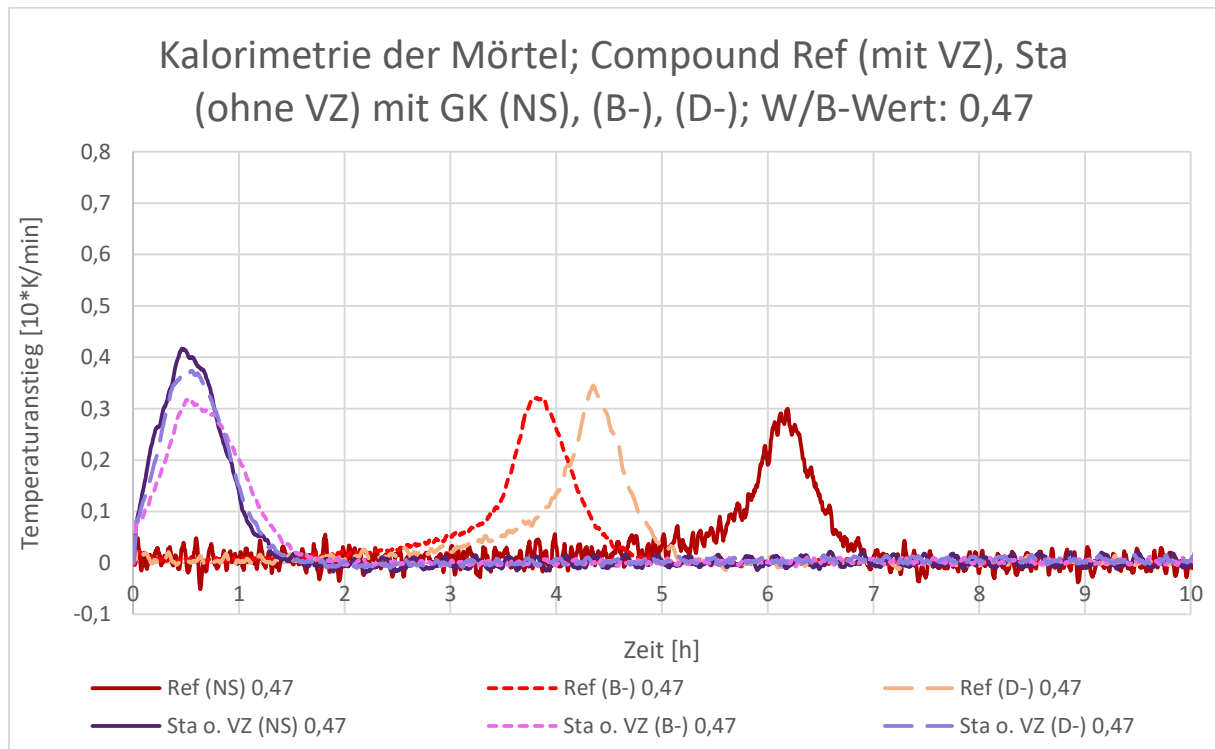


Abbildung 20: Kalorimetrie der Mörtel; Compound Ref (mit VZ), Sta (ohne VZ) mit GK (NS), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47

Durch das Fehlen des VZ sind bei allen Proben mit dem Compound Standard keine Induktions-perioden zu erkennen. Der Abbindeprozess setzt in Verbindung mit allen GK unmittelbar nach dem Anrühren des Mörtels ein und erreicht nach etwa 2 h einen Wert von 0. Lediglich die Maxima der jeweiligen Kurven unterscheiden sich in Abhängigkeit von der GK. Der Normsand erreicht mit 4 K/min den höchsten Peak, GK D - mit 3,6 K/min den zweithöchsten und GK B - mit 3,1 K/min den niedrigsten Peak. Somit unterscheiden sich die Kurven der Proben mit dem Compound Standard nur quantitativ voneinander. Durch den fehlenden VZ und das sofort beginnende Abbinden, scheint der Einfluss der GK auf den Hydratationsprozess des Com-pounds Sta an dieser Stelle irrelevant zu sein, da die Induktionsperiode nicht noch weiter verkürzt werden kann.

Bei der Referenz hingegen ist der Einfluss der GK auf den Abbindeprozess erkennbar, da die Induktionsperiode bei der Probe mit dem Normsand etwa 4 h andauert. Durch die GK B - und D - wird diese entsprechend verkürzt, sodass der Abbindeprozess bei diesen Proben früher einsetzt.

Zudem wird unter Einsatz der GK im Vergleich zu den Ergebnissen der Leimproben, der maximale Wert der Wärmerate reduziert. Dies liegt vermutlich am reduzierten BM-Anteil durch den Einsatz der GK im Mörtel.

Auffällig sind die enormen Unterschiede bei der Kalorimetrie der beiden Proben Standard und Referenz. Dagegen fallen die Differenzen bei der Längenänderung zwischen den Proben sehr gering aus. Abgesehen davon, dass bei der Standardprobe mit der GK B - die

3. Experimentelle Untersuchungen

stärksten Längenänderungen ermittelt werden und bei der Referenzprobe mit der GK D -, sind die Intensitäten der Längenzunahmen miteinander vergleichbar. Folglich wäre anzunehmen, dass unabhängig von der Anwesenheit des VZ Volumenexpansionen ablaufen, die genauen Reaktionsmechanismen in Abhängigkeit an den VZ allerdings beeinflusst werden können. Dafür sprechen die Ergebnisse aus der Schwindrinnenmessung. Bei den Proben Sta, A, B, C führt stets die GK B - zu den höchsten Längenänderungen, nur bei der Referenz (mit VZ) führt die GK D - zu den höchsten Längenänderungen.

Abschließend ist zu sagen, dass die volumenexpansiven GK primär einen Einfluss auf die Induktionsperiode ausüben und dafür sorgen, dass ein verfrühter Abbindeprozess im Vergleich zu den Proben mit dem Normsand stattfindet. Zudem beeinflussen sie auch den eigentlichen Abbindeprozess, vereinzelt werden die Maxima der Peaks erhöht oder Anstiege fallen steiler, bzw. flacher aus. Im Vergleich zu den Leimproben werden in Abhängigkeit an das jeweilige Compound die Maxima der Wärmeraten sogar erhöht, trotz des reduzierten BM-Anteils, welcher für die Wärmeentwicklung die entscheidende Rolle spielt. Dies kann beim eigens hergestellten Compound B festgestellt werden.

Ultraschall-Laufzeit-Messung

Ergänzend zu der kalorimetrischen Untersuchung wird eine Ultraschall-Laufzeit-Messung vorgenommen, um den Einfluss der Gesteinskörnung auf den Erhärtungsprozess zu untersuchen. Dabei wird die Laufzeit mittels Ultraschall gemessen, anhand welcher eine Aussage über die Gefügestruktur des Mörtels möglich ist.

Die Mörtelmischungen werden entsprechend 3.4.1 hergestellt. Insgesamt wird mit einer Feststoffmenge von 200 g gearbeitet, sodass 70 g Bindemittel und 130 g Gesteinskörnung für eine Probe verwendet werden. Die Zusatzmitteldosierung erfolgt ebenfalls nach 3.4.1, Messreihe 1.

In eine zylinderförmige Gummiform wird die Mörtelmasse gefüllt. Auf der einen Seite der Form befindet sich der Schallsender und auf der darüberliegenden Seite der Schallempfänger. Diese werden vorab mit Vaseline bestrichen. Zudem befindet sich noch eine Temperaturmesseinheit in der Form. Nachdem die Mörtelmasse in die Gummiform gefüllt wurde, wird die Messung gestartet und der Sender schickt alle 60 s ein Ultraschall-Signal zu dem Empfänger durch den Mörtel und der Computer berechnet die jeweilige Zeit, die das Ultraschall-Signal durch den Mörtelquerschnitt benötigt. Während der Hydratation wachsen die DH-Kristalle und bilden mit der Zeit ein dichter werdendes Gefüge aus, indem sie miteinander verfilzen. Somit nimmt die Ultraschall-Laufzeit mit dem Fortschreiten der

3. Experimentelle Untersuchungen

Hydratation zu. Sobald diese abgeschlossen ist, nimmt das Gefüge nicht weiter an Dichte zu, folglich steigt die Ultraschall-Laufzeit nicht weiter an.

Es werden der Referenzcompound und die Compounds B und C mit den Gesteinskörnungen Normsand und B - verglichen. Vereinzelt wird auch die GK D - mit dem Compound B untersucht. Der W/B-Wert beträgt 0,47. Die Ergebnisse sind im nachfolgenden Diagramm dargestellt.

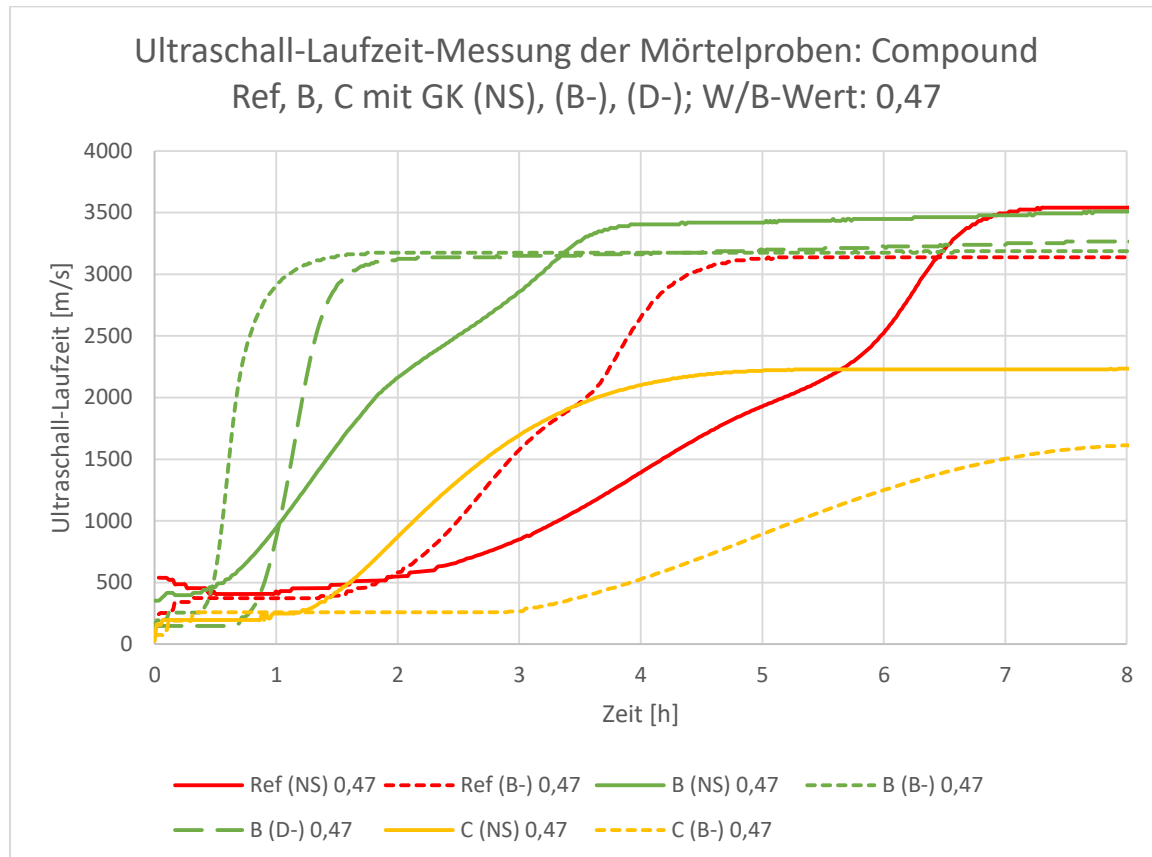


Abbildung 21: Ultraschall-Laufzeit-Messung der Mörtelproben: Compound Ref, B, C mit GK (NS), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47

Die Gesteinskörnungen beeinflussen das Erhärtungsverhalten der jeweiligen Bindemittel auf unterschiedliche Weise. Bei den Proben mit den Compounds Referenz und B ist in Verbindung mit dem Normsand der längste Abbindeprozess zu verzeichnen. Bei der Referenzprobe ist die maximale Gefügedichte nach 7 h und bei der Probe B nach 4 h erreicht. Zwar weisen beide Kurven ab diesem Zeitpunkt noch einen minimalen Anstieg auf, aber die wesentliche Phase des Abbindens scheint abgeschlossen zu sein.

Die Zunahme der Gefügedichte erfolgt bei beiden Proben stufenweise. Bei der Probe B beispielsweise setzt ab dem Zeitpunkt $t = 0,5$ h der steilste Anstieg der Kurve ein, ab dem Zeitpunkt $t = 1,75$ h flacht die Kurve leicht ab, aber steigt weiterhin. Ab dem Zeitpunkt $t = 3,25$ h wird der Kurvenanstieg erneut steiler und flacht ab $t = 4,0$ soweit ab, dass sie sich einen Wert annähern zu scheint. Diese Stufen sind ebenfalls bei der Referenzprobe ersichtlich, lediglich unterscheiden sich die jeweiligen Steigungen voneinander. Auffällig ist

3. Experimentelle Untersuchungen

zudem, dass das erreichte Maximum der Ultraschall-Laufzeit mit ca. 3500 m/s bei beiden Proben identisch ist. Aufgrund der besseren Frischmörteleigenschaften der Referenz (keine Schaumbildung wie bei den eigens hergestellten Compounds) wäre denkbar gewesen, dass diese Probe ein dichteres Gefüge aufweist. Wie in den nachfolgenden Festigkeitsuntersuchungen noch näher erläutert wird, weist die entsprechende Sta Probe (vergleichbar mit Ref, nur ohne VZ) stets die höchsten Festigkeiten im Vergleich mit den Proben der eigens hergestellten Compounds auf (siehe Messreihe 1, Abschnitt 3.4.4). Die höhere Festigkeit resultiert folglich nicht aus der Gefügedichte, sondern vermutlich aus dem besseren Verbund zwischen BM und GK bei der Referenz-/Standardprobe. Die geringe Entmischungsneigung der Proben mit den eigens hergestellten Compounds lässt vermuten, dass dieser Verbund dort noch optimiert werden kann. Dies müsste in weiterführenden Untersuchungen genauer analysiert werden.

Die Kurven der Proben mit der GK B - unterscheiden sich nicht nur quantitativ, sondern auch qualitativ voneinander. Bei der Referenzprobe lassen sich die Stufen, welche zuvor auch bei der Probe mit der GK NS festgestellt wurde, ebenfalls erkennen, der erste Anstieg fällt allerdings steiler aus als bei der Probe mit NS. Nach etwa 5 h ist die maximale Gefügedichte mit 3100 m/s erreicht. Bei der entsprechenden Probe mit dem Compound B sind diese stufenweisen Zunahmen der Gefügedichte nicht mehr festzustellen. Hier setzt nach 0,4 h ein steiler exponentieller Anstieg ein, welcher nach etwa 2 h abgeflacht ist und sich dem Wert von 3150 m/s annähert. Auch unter der Verwendung der GK B - sind die maximalen Werte der Ultraschall-Laufzeit bei beiden Compounds miteinander vergleichbar.

Die Probe mit dem Compound B und der GK D - weist im Vergleich zu der Probe mit der GK B - eine längere Induktionsperiode auf, zudem flacht die Kurve schneller ab, sodass auch hier bei $t = 2,0$ die Hauptphase des Erhärtungsprozesses beendet ist. Bei der Kalorimetrie ist diese verlängerte Induktionsperiode bei der Probe mit der GK D - allerdings nicht festzustellen. Die Zunahme der Wärmerate erfolgt dort erst langsamer und nach 1 h nimmt diese exponentiell zu. Zudem erreicht die Probe mit 4,5 K/min einen deutlich höheren Maximalwert als die Probe mit der GK B - mit 2,8 K/min. Somit ist eine erhöhte Wärmeentwicklung nicht mit einer früheren bzw. intensiveren Gefügeverdichtung gleichzusetzen.

Bei den Proben mit dem Compound C werden deutlich niedrigere Maximalwerte erreicht, aufgrund der abweichenden BM-Rezeptur (80% All, 20% α -HH). Auffällig ist hier allerdings, dass nicht die Probe mit dem NS den längsten Erhärtungsprozess aufweist, sondern die Probe mit der GK B -. Nicht nur die Induktionsperiode wird von 1,25 h auf 3 h verlängert, auch die Zunahme der Gefügedichte wird verlangsamt, der Kurvenanstieg ist im Vergleich zur NS Probe flacher und scheint auch nach 8 h bei einem Wert von 1600 m/s noch nicht

3. Experimentelle Untersuchungen

vollständig abgeschlossen zu sein. Bei der entsprechenden NS Probe ist das Maximum nach 5 h mit einer Ultraschall-Laufzeit von 2200 m/s erreicht. Folglich scheint der hohe A II Gehalt die schnellere Verfestigung, welche die volumenexpansiven Sande bei den Compounds Ref und B auslösen, nicht nur zu unterbinden, sondern die Reaktionsmechanismen in die gegensätzliche Richtung zu treiben, sodass eine verspätete Verfestigung stattfindet.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die volumenexpansiven GK in Abhängigkeit an das BM eine verfrühte oder verspätete Verfestigung im Vergleich zum NS hervorrufen können. Vergleicht man die GK B - und D - miteinander, wird deutlich, obwohl Differenzen bei den Längenänderungsmessungen festgestellt wurden, dass die beiden GK vergleichbare Gefüge-strukturen hervorbringen. Somit ist keine Korrelation zwischen dem Längenänderungs-verhalten und der endgültigen Gefügedichte festzustellen, da sonst Unterschiede zwischen den beiden GK bei der Ultraschall-Laufzeit-Messung in Bezug auf die Maximalwerte hätten festgestellt werden müssen. Auch die Festigkeitsuntersuchungen (Abschnitt 3.4.4) zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den entsprechenden Proben auf.

Ob die leicht verlängerte Induktionsperiode bei der Probe B (D-) im Vergleich zur Probe B (B-) einen Beitrag zur verringerten Längenzunahme der entsprechenden Probe beitragen könnte, müsste näher untersucht werden.

Zuletzt werden die Mörtelproben mit den Compounds Ref und Sta mit den Gesteinskörnungen Normsand und B - mittels Ultraschall-Laufzeit-Messung untersucht, um den Einfluss des Verzögerers zu analysieren. Der W/B-Wert beträgt 0,47.

3. Experimentelle Untersuchungen

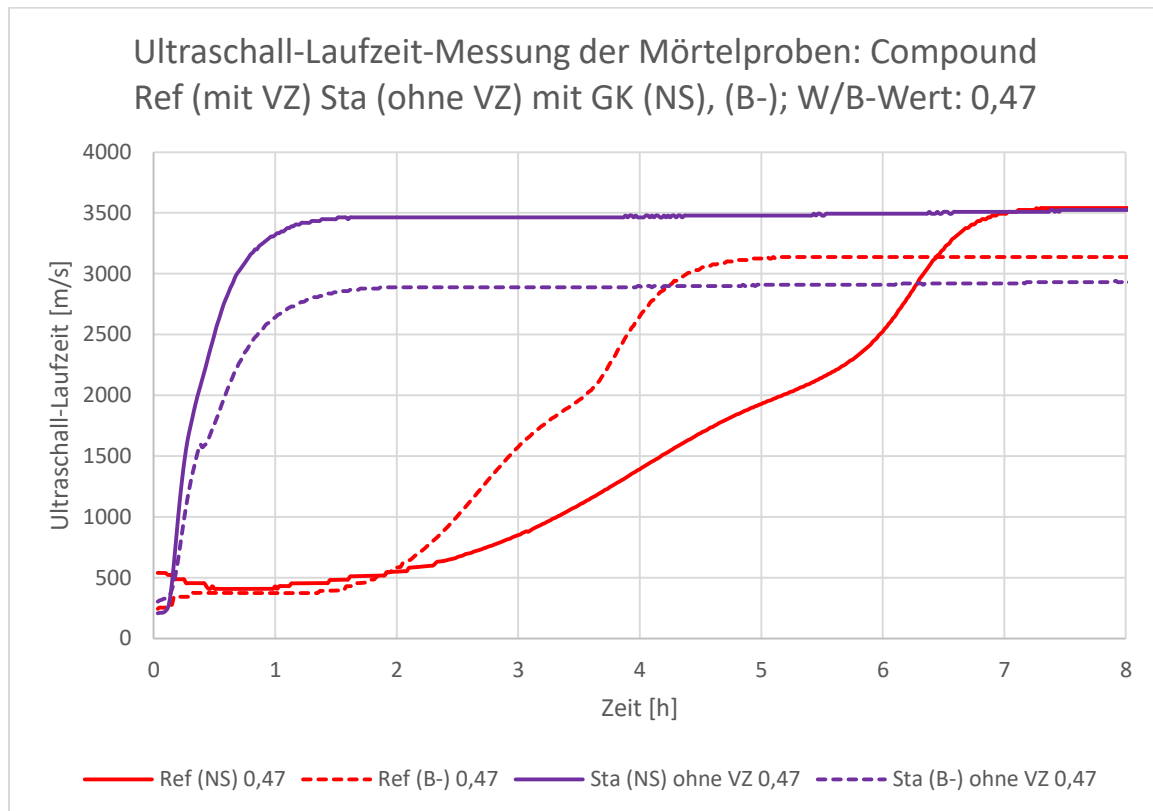


Abbildung 22: Ultraschall-Laufzeit-Messung der Mörtelproben: Compound Ref (mit VZ), Sta (ohne VZ) mit GK (NS), (B-); W/B-Wert: 0,47

Ohne Einsatz des VZ wird die Induktionsperiode der Proben mit dem Standardcompound nahezu vollständig aufgehoben. Bereits nach 10 min setzt bei beiden Proben ein exponentieller Anstieg ein, welcher bei der Probe mit NS allerdings steiler ist. Bei der Probe mit der GK B - hingegen ist nach 20 min eine Stufe zu erkennen, die einen abgeflachten Anstieg einleitet. Nach ca. 2 h ist bei beiden Proben die maximale Ultraschall-Laufzeit erreicht. Bei der Normsandprobe des Standards entspricht sie mit 3500 m/s den Wert der Referenz, bei der Probe mit der GK B - hingegen wird ein Wert von 2850 m/s erreicht, bei der entsprechenden Probe der Referenz ein Wert von 3100 m/s.

Folglich scheint das Fehlen des VZ einen nachteiligen Einfluss unter Verwendung mit der volumenexpansiven GK auf die Gefügedichte auszuüben. Weiterführend müsste an dieser Stelle zudem die GK D - untersucht werden, da bei der Längenänderungsmessung Unterschiede zwischen den Proben mit den Compounds Standard und Referenz bzgl. der GK festgestellt werden. Der Compound Sta weist in Verbindung mit der GK D - die stärkste Längenänderung auf, die Referenz mit der GK B -. Dieser Zusammenhang müsste in weiteren Ultraschall-Messungen näher untersucht werden.

3. Experimentelle Untersuchungen

Hydratationsgrad

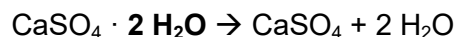
Der Hydratationsgrad der Mörtelproben wird mittels Wägung nach der Trocknung im Muffelofen bei 350 °C bestimmt. Dazu werden Stücke der 7 d alten Mörtelprismen, welche nach der Ermittlung der Festigkeitswerte aus Kapitel 3.4.4 luftdicht aufbewahrt wurden, abgewogen und in einer feuerfesten Schale in den Muffelofen gegeben. Sobald die Massekonstanz erreicht ist, werden die Prismenstücke erneut abgewogen.

Es wird angenommen, dass das Bindemittel vollständig hydratisiert und nur DH vorhanden ist und nach der Trocknung im Muffelofen nur noch Anhydrit vorhanden ist. Des Weiteren wird angenommen, dass die Gesteinskörnung homogen in der Probe verteilt ist und wird daher nicht aus der Probe entfernt. Um den HG zu bestimmen, wird die theoretisch mögliche Menge an Kristallwasser aus DH ermittelt und mit der tatsächlichen Menge ins Verhältnis gesetzt.

Wie in der Beispielrechnung von der Probe Sta (NS) wird auch der HG der anderen Proben bestimmt:

- Einwaage Probe vor Trocknung: 15,7581 g
- Einwaage Probe nach Trocknung: 14,5236 g
- Verhältnis BM/GK: 0,35/0,65
- Menge GK: $15,7581 \text{ g} \cdot 0,65 = 10,2428 \text{ g}$
- Menge CaSO_4 (vor Trocknung): $15,7581 \text{ g} \cdot 0,35 = 5,5153 \text{ g}$
- Kristallwassergehalt: $5,5153 \text{ g} \cdot 0,21(*) = 1,1582 \text{ g}$
- Menge A (nach Trocknung): $14,5236 \text{ g} - 10,2428 \text{ g} = 4,2808 \text{ g}$
- Kristallwassergehalt: $4,2808 \text{ g} \cdot 0,21 = 0,8990 \text{ g}$
- $d = 5,5152 \text{ g} - 4,2808 \text{ g} = 1,2345 \text{ g}$
- $\text{HG} = d / 1,1582 \text{ g} = 1,2345 \text{ g} / 1,1582 \text{ g} = 1,07$

* Der Faktor **0,21** resultiert aus folgendem stöchiometrischen Verhältnis:



Molmassen:	$136 \text{ mol} \cdot 36 \text{ mol}$
	$= 172 \text{ mol}$
Prozentuales Verhältnis	$79 \% + 21 \%$
	$= 100 \%$

Da der HG nach dieser Berechnung > 1 ist, liegt hier ein Messfehler vor. Vermutlich ist der tatsächliche GK-Anteil geringer als der theoretische Anteil von 65 %. Aufgrund dessen konnte nur bei den Proben mit dem Compound C ein $\text{HG} < 1$ ermittelt werden. Daher ist es

3. Experimentelle Untersuchungen

nicht möglich, eine genaue Aussage über den HG der Proben zu treffen. Lediglich die Verhältnisse der HG können mit Einschränkungen und nur zur groben Orientierung miteinander verglichen werden.

Untersucht werden alle Bindemittelcompounds mit den Gesteinskörnungen Normsand und B -. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 17: Hydratationsgrad der Mörtelprismen, Alter 7 d

Proben- bezeichnung	HG [%]
Sta (NS)	106,6
A (NS)	107,9
B (NS)	113,8
C (NS)	73,9
Sta (B-)	120,2
A (B-)	120,1
B (B-)	122,5
C (B-)	83,5

Zum einen wird der Einfluss der unterschiedlichen Bindemittelarten auf die Hydratation deutlich, zum anderen ist auch ein starker Unterschied zwischen den Gesteinskörnungen erkennbar.

Insgesamt übt die GK B - einen positiven Einfluss auf die Hydratation aus, da alle Proben in Verbindung mit dieser GK einen höheren HG erzielen als in Verbindung mit dem Normsand. Allerdings ist die Intensität der Einflussnahme abhängig vom Bindemittel. Die Proben mit dem Compound Sta und A erreichen vergleichbare Werte und die Proben mit dem Compound B erzielen die besten HG, vor allem bei der GK NS ist der Unterschied zu den anderen Compounds signifikant.

Aufgrund des hohen Anhydritanteils beim Compound C sind die HG dieser Mörtelproben am geringsten. Sie sind um ca. 30 % geringer als die Werte bei den entsprechenden Proben derselben GK mit den anderen Compounds.

Dennoch ist die Aussagekraft dieser Untersuchung als kritisch zu betrachten und die Ergebnisse müssten durch eine Messwiederholung erneut überprüft werden.

Phasenanalyse der Mörtelproben mittels XRD

Nachdem die Mörtelproben wie in 3.4.1 in der Schwindrinne untersucht wurden, werden die Mörtelprismen, welche zuvor bei 40°C in einem Trockenschrank bis zur Massenkonstanz

3. Experimentelle Untersuchungen

getrocknet wurden, mittels Röntgendiffraktometrie in einem Alter von 7 d auf ihre mineralogischen Phasen untersucht, um vor allem Unterschiede zwischen den Gesteinskörnungen B - und D - und auch zwischen den Bindemitteln zu analysieren. Aufgrund des zeitlichen Rahmens werden nur die Mörtelproben Sta (D-), A (B-), B (NS) und C (D-) untersucht. Um genauere Vergleiche vornehmen zu können, hätte an dieser Stelle eine größere Probenauswahl getroffen werden müssen.

Dazu wird das Material gebrochen und mittels einer ZrO₂ Mahlgarnitur gemahlen. Mittels eines Siebes mit einer Maschenweite von < 63 µm wird das Material abgesiebt. Als Probenträger wird ein Kunststoffprobenträger mit einer 1 mm hohen Umrandung verwendet. Anschließend wird das Material quantitativ in dem Diffraktometer XRD 3003 TT MZ VI mit 12-fach Probenwechsler, Fa. Seifert untersucht.

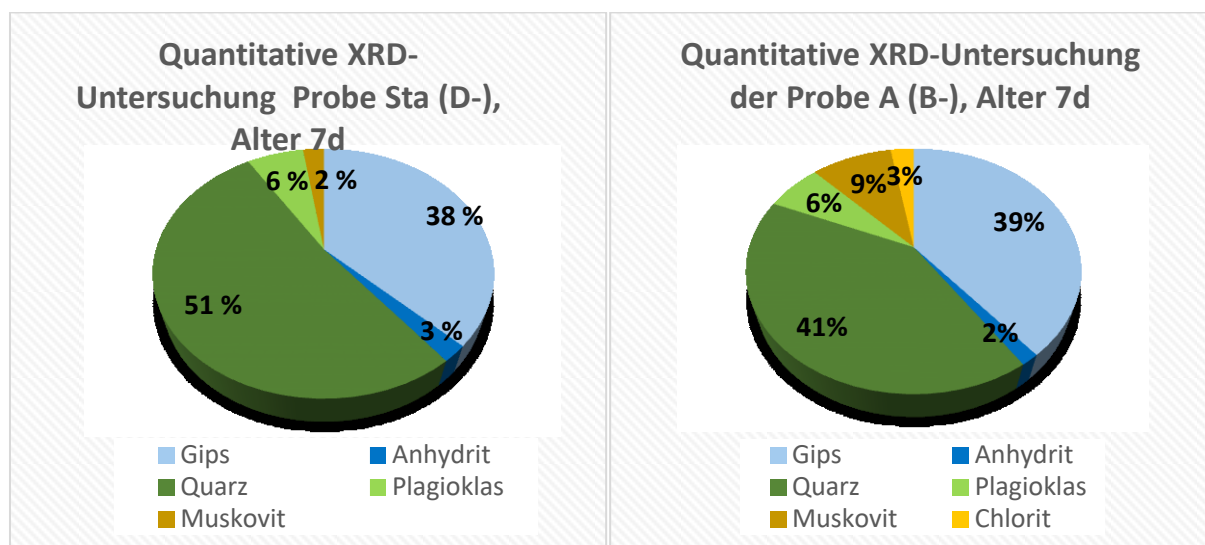


Abbildung 23: Quantitative Ergebnisse XRD Mörtelprobe A (B-), Probenalter 7 d

Abbildung 24: Quantitative Ergebnisse XRD Mörtelprobe Sta (D-), Probenalter 7d

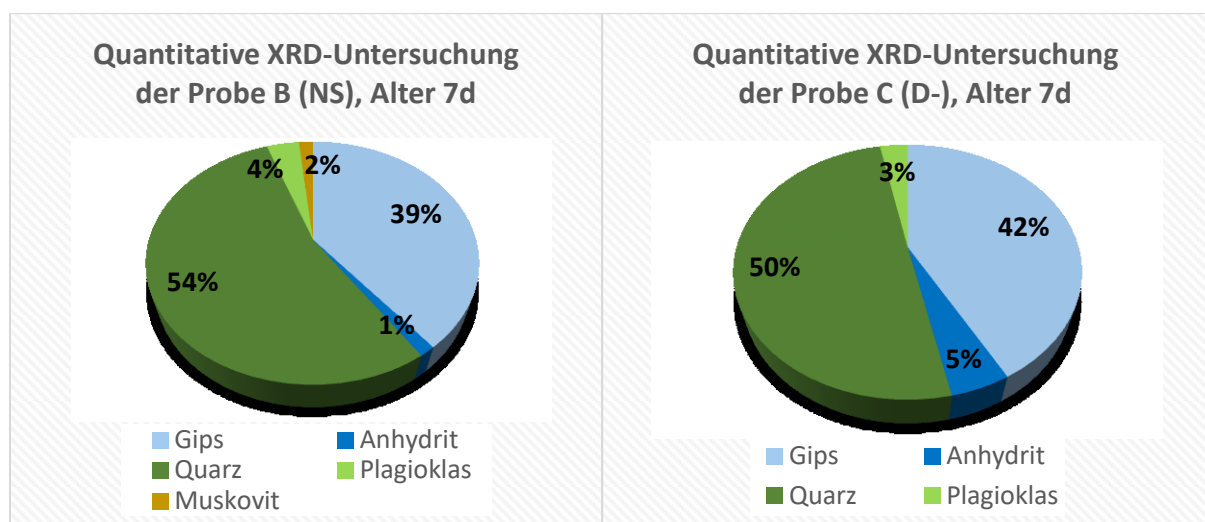


Abbildung 25: Quantitative Ergebnisse XRD Mörtelprobe C (D-), Probenalter 7d

Abbildung 26: Quantitative Ergebnisse XRD Mörtelprobe B (NS), Probenalter 7d

3. Experimentelle Untersuchungen

Grundsätzlich gelten die vorliegenden Ergebnisse nur als erste Orientierung, da vor allem bei der quantitativen Analyse mittels XRD die Probenpräparation eine sehr entscheidende Rolle spielt. Beispielsweise muss die Vorzugsrichtung der Gipskristalle berücksichtigt werden, diese übt einen starken Einfluss auf die jeweiligen Peaks aus. Durch eine falsche Präparation kann die Ausbildung der Peaks beeinflusst werden, sodass die Ergebnisse von der Realität abweichen können. Ebenso ist die Messgenauigkeit zu beachten, da geringe Spuren mittels XRD nicht mehr detektiert werden können, dies hat zur Folge, dass die quantitativen Angaben nur ungefähre Richtwerte sind und nicht auf die Nachkommastelle genau festgelegt werden können.

Alle Proben enthalten die Phasen Gips, Anhydrit, Quarz und Plagioklas. Abgesehen von der Probe mit dem Compound C enthalten auch alle untersuchten Proben das Schichtsilikat Muskovit, vermutlich war es dort nur in sehr geringen Spuren vorhanden, sodass es nicht detektiert werden konnte. Dieses ist vermehrt mit einem Anteil von 9 % in der Probe mit dem Compound A und der GK B - vorhanden, wohingegen es bei den Proben mit dem NS und der GK D - nur zu 2 % vorliegt. In der vorangegangenen wissenschaftlichen Kollegarbeit wurde der Hypothese nachgegangen, ob das Schichtsilikat mitverantwortlich für die Volumenexpansion ist, indem es Aluminiumkomplexe für eine potentielle Ettringitbildung zur Verfügung stellt. Im Rahmen dieser Arbeit konnte diese Theorie nicht bestätigt werden, allerdings bedarf die Untersuchung eine Optimierung der Bedingungen. Denkbar wäre dennoch eine Beteiligung an der Volumenexpansion, allerdings nicht im Zusammenhang mit einer gleichzeitigen Ettringitbildung.

Die Anteile des Gipses lassen sich nur bedingt miteinander vergleichen. Auffällig ist aber, dass die Probe mit dem Compound C (80% TA-Gehalt) den höchsten Gipsanteil enthält. Um zu überprüfen, ob dieser Anteil auf die Messungenauigkeit oder die Präparation zurückzuführen ist, bedarf es an dieser Stelle Ergebnisse weiterer Proben.

Idealerweise müssten noch alle Compounds vor allem in Verbindung mit der GK NS und B - hinsichtlich ihrer Phasenanteile analysiert werden, da so auch eine Aussage über die Hydratationsgerade über den Anteil der Gipsphase der einzelnen Proben getroffen werden könnte.

3. Experimentelle Untersuchungen

3.4.3. pH-Wert Ermittlung

Die pH-Werte aller Mörtelproben der Messreihe 1 werden mittels einer pH-Elektrode bestimmt. Dazu werden die Mörtel in einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 10:1 hergestellt und untersucht. Vorab wird die pH-Elektrode kalibriert. Die Messung erfolgt bei Normklima. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt:

Tabelle 18: pH-Werte der Mörtelproben

Probenbezeichnung	pH-Wert
Sta (NS)	11,55
Sta (A+)	11,37
Sta (B-)	11,20
Sta (D-)	11,24
A (NS)	9,51
A (A+)	9,21
A (B-)	9,48
A (D-)	9,28
B (NS)	9,15
B (A+)	9,45
B (B-)	9,26
B (D-)	10,06
C (NS)	12,44
C (A+)	12,42
C (B-)	12,53
C (D-)	12,52

Die niedrigsten pH-Werte erreichen die Compounds A und B mit Werten von durchschnittlich 9,37 bzw. 9,48. Der Standardcompound erreicht mit 11,34 im Durchschnitt den zweithöchsten pH-Wert und der Compound C den höchsten Wert mit 12,48.

Durch den hohen Weißkalkhydrat-Gehalt im Compound C, der der 10-fachen Menge der Compounds A und B entspricht, ist diese Probe sehr alkalisch. Bei weiteren Untersuchungen, wäre es möglicherweise sinnvoll, den Gehalt an Weißkalkhydrat anzupassen, um den pH-Wert des Compounds C zu senken. Da dieser Compound aufgrund seiner schlechten Eigenschaften für eine potentielle Verwendung im CAF untauglich ist, wird diese Anpassung verworfen.

Da die Zusatzmitteldosierung bei dem Standard unbekannt ist, kann nur angenommen werden, dass in diesem Compound ein ähnlich hoher Weißkalkhydrat-, oder Zementgehalt vorhanden ist.

3. Experimentelle Untersuchungen

Tendenzen bezüglich des Einflusses der GK lassen sich allerdings nicht feststellen. Lediglich bei der Probe B (D-) fällt der deutlich höhere pH-Wert von 10,06 im Vergleich zu den anderen Proben mit dem Compound B auf. Eine Messwiederholung würde an dieser Stelle aufzeigen, ob wirklich ein signifikanter Unterschied existiert oder ob es sich dabei um einen Messfehler handelt. Aus zeitlichen Gründen ist die Wiederholung allerdings nicht umsetzbar. Ansonsten weist keine der anderen Analysemethoden eine vergleichbare Abweichung bzw. Besonderheit bei der Probe B (D-) auf.

Der pH-Wert beeinflusst neben der Temperatur ebenfalls die Löslichkeit der Calciumsulfate. Durch die Zugabe von beispielsweise Weißkalkhydrat wird nicht nur der pH-Wert durch die Abgabe von Hydroxidionen in der Lösung erhöht, gleichzeitig wird dabei die Löslichkeit des Anhydrits II gesteigert, sodass der Hydratationsprozess schneller ablaufen kann. [2, 4]

Denkbar wäre, dass sich der pH-Wert auch auf die Lösungsgeschwindigkeit der Nebenbestandteile der GK auswirken könnte. Da die Proben mit dem Standardcompound und dem Compound C nicht nur die höchsten Längenänderungen aufweisen, sondern auch die höchsten pH-Werte, könnte ein Zusammenhang zwischen einem erhöhten pH-Wert und einer beschleunigten Lösungsgeschwindigkeit der volumenexpansiven Bestandteile der GK existieren.

Weiterführende Untersuchungen sind für genauere Aussagen aber vonnöten, beispielsweise könnte der pH-Wert durch Reduzieren des CL90 Anteils im Compound C gesenkt werden, um im Anschluss weitere Längenänderungsmessungen durchzuführen. Demnach müssten an dieser Probe geringere Längenzunahmen festgestellt werden, als bei der Probe mit dem hohen pH-Wert.

3.4.4. *Ermitteln mechanischer Eigenschaften*

Die Prüfung der Festigkeit erfolgt nach DIN EN 13454-2, welche sich an DIN EN 196-1 orientiert. Die Herstellung, Zusammensetzung und Lagerung der Proben weicht allerdings von den normgerechten Anforderungen ab, um den Vorgaben der Aufgabenstellung und den Eigenschaften des Calciumsulfat-Baustoffes gerecht zu werden.

Der Mörtel aus 630 g Bindemittel und 1170 g Gesteinskörnung wird mit einem einheitlichen W/B-Wert von 0,47 und dem vorgegebenen Fließmaß von 240 mm \pm 10 nach dem im 3.3. aufgeführten Mischregime gemischt. Vorab werden die Zusatzmittel den jeweiligen Bindemittel-Mischungen zugegeben und unter 2-minütigem Rühren homogenisiert. Dem Standard-Estrichcompound werden bereits werksintern Zusatzmittel hinzugeben. Neben dem Normsand werden auch die Mörtel mit den GK B- und D-, vereinzelt auch mit der GK A+, untersucht.

3. Experimentelle Untersuchungen

Die Mörtelmasse wird in Styroporformen mit je drei Prismen gefüllt. Dies erfolgt in zwei Lagen, wobei jede Lage mittels 10-maligen „Stochern“ mit einem Spatel verdichtet wurde. Die Prismen (40 mm x 40 mm x 160 mm) werden ohne Abdeckung im Laborklima (20°C, 65% relative Luftfeuchte) gelagert, um die Bedingungen der tatsächlichen Einbausituation eines Estrichs so gut wie möglich zu simulieren. Nach einem Tag werden die Proben ausgeschalt und ab dem 7. Tag bis zur Massenkonstanz im Trockenschrank bei 40 °C getrocknet. Bis zum Prüftermin werden die Prismen luftdicht aufbewahrt. Die Prüfung der Druck- und Biegezugfestigkeit erfolgt mit einer Zwick-Belastungsmaschine nach DIN EN 196-1. Die Probenauswahl erfolgt äquivalent zu den Proben der Messreihen aus den Längen-änderungsversuchen mittels Schwindrinne aus Kapitel 3.4.1.

Die Abbildung 27 zeigt die Mittelwerte der Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben des Standards und der drei Compounds A, B und C mit Normsand. Der W/B-Wert aller Mörtel-proben beträgt 0,47 und das Prüfalter 7 d. Die Zusatzmitteldosierungen der eigens her-gestellten Compounds erfolgt entsprechend der Messreihe 1 der Längenänderungsmessung.

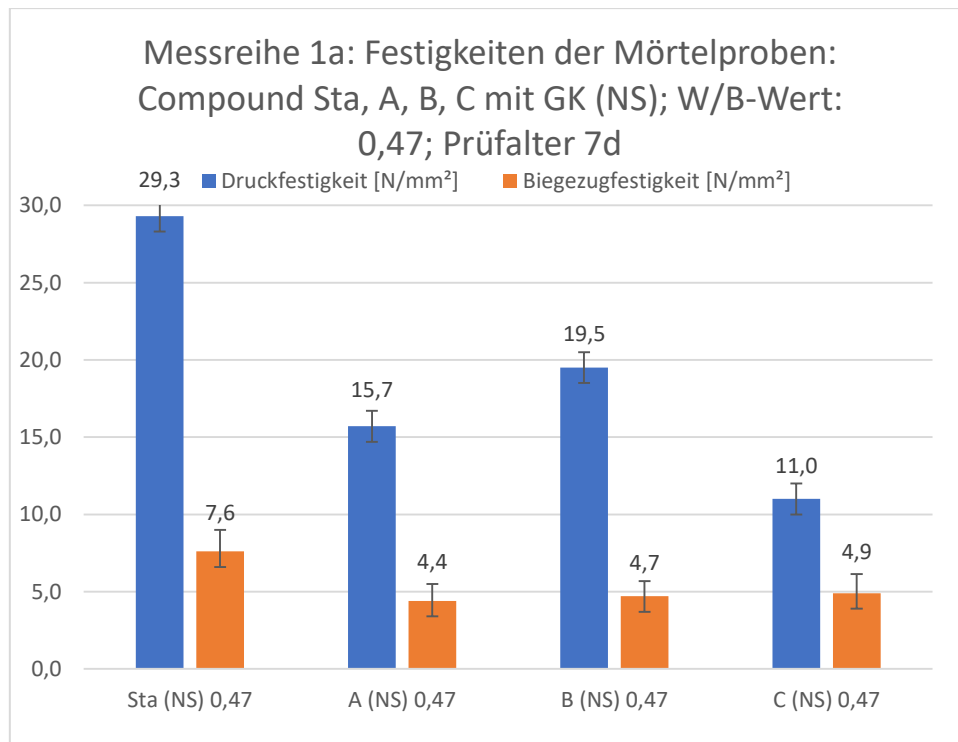


Abbildung 27: Messreihe 1a: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (NS); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d

Die Standardprobe weist sowohl die höchste Druckfestigkeit mit 29,3 N/mm² als auch die höchste Biegezugfestigkeit mit 7,6 N/mm² auf. Bei der Probe B NS wird die höchste Druckfestigkeit mit 19,5 N/mm² unter den eigens hergestellten Compounds festgestellt.

3. Experimentelle Untersuchungen

Probe C NS weist allerdings die höchste Biegezugfestigkeit mit 4,9 N/mm² auf.

Folglich sind die Werte der Proben mit den eigens hergestellten Compounds in Bezug auf die Standardprobe um 30 % - 60 % geringer.

Erste Anzeichen dafür sind schon beim Entschalen der Prismen erkennbar. Die Probe Sta NS (siehe Ref NS auf Abbildung 28) weist eine sehr glatte Oberfläche ohne Ablöseerscheinungen auf. Die Proben A NS und B NS sind leicht porös und der Mörtel lässt sich relativ leicht an einigen Stellen der Oberfläche entfernen. Die Probe C NS weist aufgrund des hohen Anhydritgehalts die stärksten Ablöseerscheinungen auf, da der Hydratationsfortschritt hier am geringsten war. Zudem ist ebenfalls eine poröse Oberfläche erkennbar. Um zukünftig potentielle Beschädigungen zu vermeiden, werden die

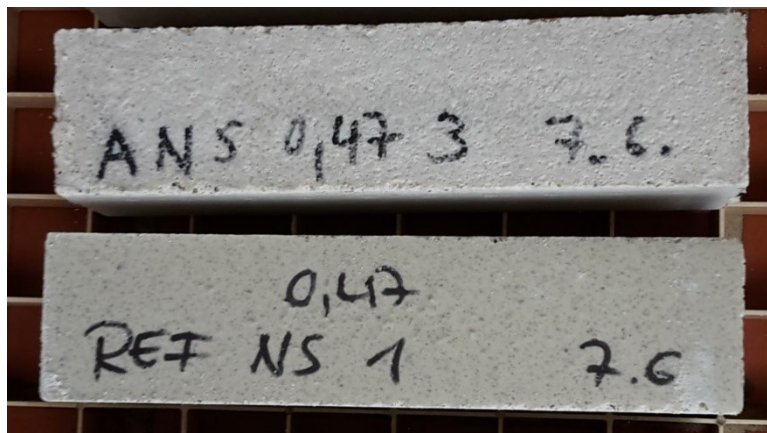
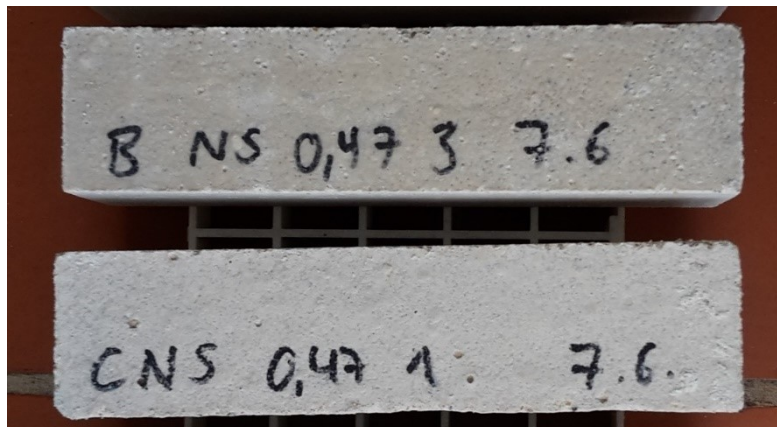


Abbildung 28: Prismen Probe A (NS), Sta (NS); W/B-Wert 0,47; nach Entschalung



Mörtelprismen mit dem Compound C erst 2 Tage nach der Herstellung entschalt.

Die Abbildung 30 zeigt die Mittelwerte der Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben des Standards und der drei Compounds A, B und C mit GK B -. Der W/B-Wert aller Mörtelproben beträgt 0,47 und das Prüfalter 7 d. Die Zusatzmitteldosierungen der eigens hergestellten Compounds erfolgt entsprechend der Messreihe 1 der Längenänderungsmessung.

Abbildung 29: Prismen Probe B (NS), C (NS); W/B-Wert 0,47; nach Entschalung

3. Experimentelle Untersuchungen

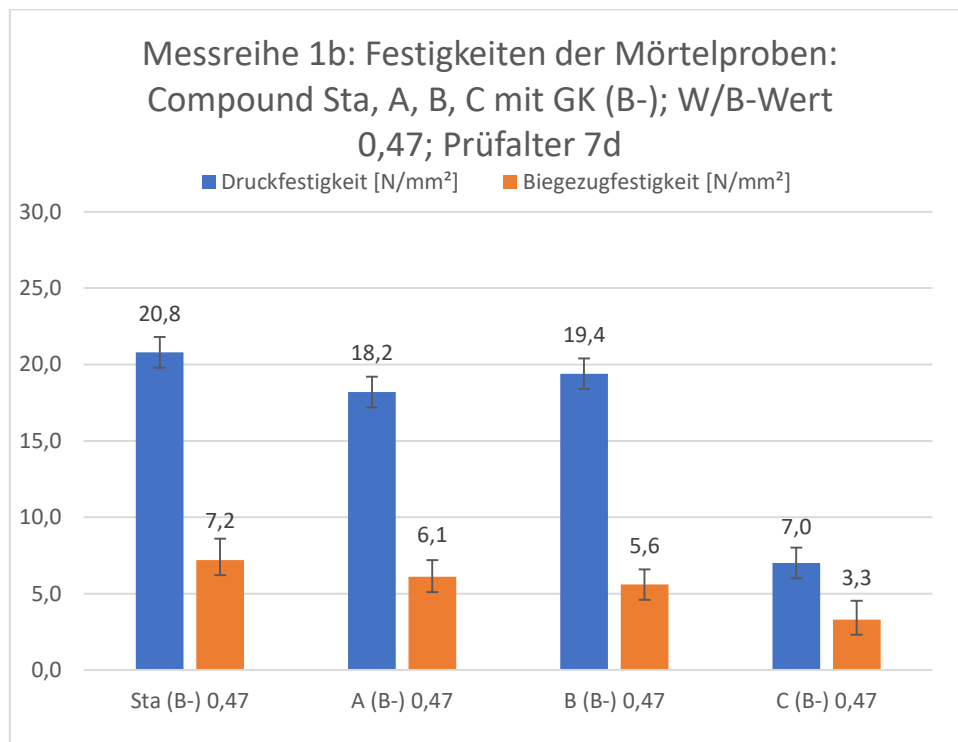


Abbildung 30: Messreihe 1b: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (B-); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d

Die Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchungen unter Verwendung der kritischen Gesteinskörnung B - unterscheiden sich überwiegend quantitativ von den entsprechenden Ergebnissen unter der Verwendung des Normsands, allerdings sind die Differenzen der Werte unter-einander der Reihe 1b nicht mehr signifikant. Die Proben mit dem Compound C sind gesondert zu betrachten.

Die Druckfestigkeit der Mörtelprobe B liegt nur etwa 7 % unterhalb des Wertes der Standardmörtelprobe. Zudem liegt die maximale Druckfestigkeit bei 20,8 N/mm², im Vergleich zu der entsprechenden Normsandstandardprobe eine Verschlechterung von ca. 30 %. Auch die Druckfestigkeit der Probe C reduziert sich um etwa 30 %. Die Probe B zeigt keine signifikante Veränderung zur jeweiligen Normsandprobe. Allerdings weist die Probe A eine Verbesserung von 20 % auf.

Gesondert sind allerdings die Biegezugfestigkeiten zu betrachten. Bei der Probe C verschlechtert sich diese im Vergleich zur entsprechenden Normsandprobe um etwa 30 %. Der Wert der Standardprobe verändert sich mit 7,2 N/mm² nicht signifikant zur Normsandprobe und bei den Proben A und B kann sogar eine leichte Steigerung der Biegezugfestigkeit festgestellt werden.

Beim Entschalen fällt auf, dass die Prismen der Standardproben zwar weiterhin die glatteste Oberfläche aufweisen, allerdings sind auch hier leichte Ablöseerscheinungen an den Prismenkanten festzustellen. Die Prismenproben A, B und C (B-) zeigen weiterhin eine

3. Experimentelle Untersuchungen

poröse Oberfläche. Die Ablöseerscheinungen bei der Probe C (B-) sind sehr stark, sodass eine Beschriftung ohne weitere Hydratationszeit nicht möglich war. Zudem bildete sich dort teilweise eine glänzende dünne Bindemittelschicht aus, die leicht abblättert. Die Prismen der Mörtelproben A und B (B-) weisen eine fleckige Oberfläche durch die Eigenfeuchte der Gesteinskörnung auf.

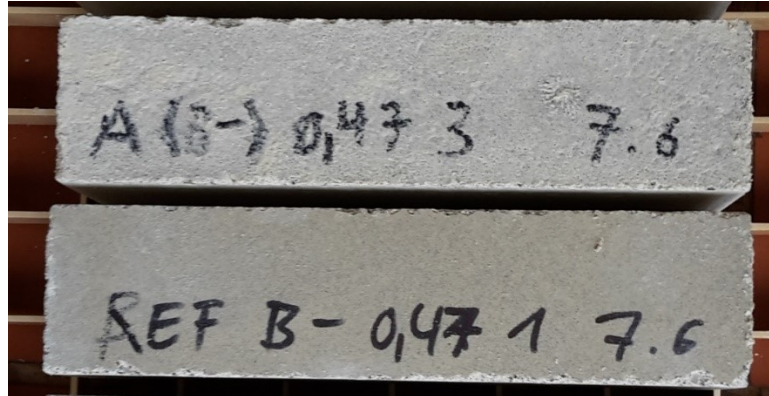


Abbildung 31: Prismen Probe A (B-), Sta (B-); W/B-Wert 0,47; nach Entschalung

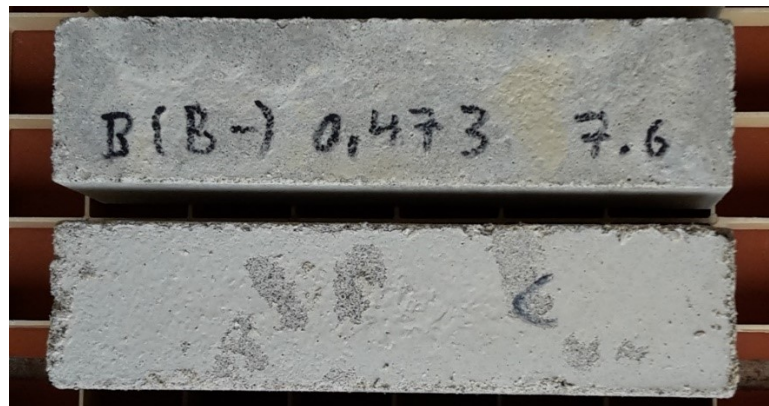


Abbildung 32: Prismen Probe B (B-), C (B-); W/B-Wert 0,47; nach Entschalung



Abbildung 33: Prismen Probe B (B-) und C (B-); W/B-Wert: 0,47

3. Experimentelle Untersuchungen

Die Abbildung 34 zeigt die Mittelwerte der Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben des Standards und der drei Compounds A, B und C mit GK D -. Der W/B-Wert aller Mörtelproben beträgt 0,47 und das Prüfalter 7 d. Die Zusatzmitteldosierungen der eigens hergestellten Compounds erfolgt entsprechend der Messreihe 1 der Längenänderungsmessung.

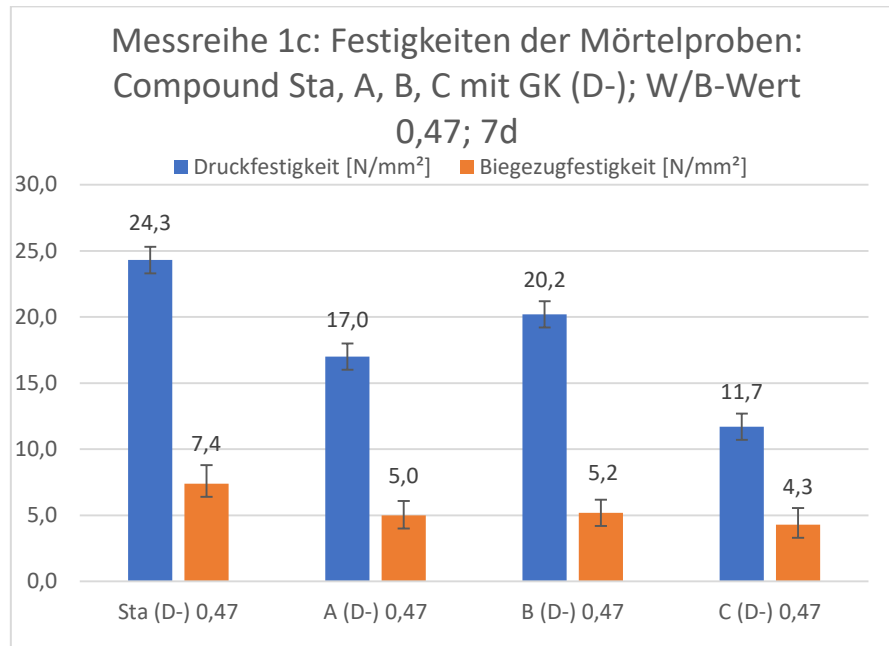


Abbildung 34: Messreihe 1c: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta, A, B, C mit GK (D-); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen der Prismen mit der Gesteinskörnung D - weichen kaum von denen der Prismen mit der Gesteinskörnung B - ab. Bis auf die Probe mit dem Compound A ist bei allen Prismen eine Druckfestigkeitssteigerung im Vergleich zu den entsprechenden Proben mit der GK B - zu verzeichnen, allerdings ist die Steigerung bei dem Compound B nicht signifikant.

Probe C (D-) weist eine Steigerung von mehr als 50 % im Vergleich zu C (B-) und die Standard-probe von knapp 20 % auf. Bei den beiden zuletzt genannten Proben ist ebenfalls eine Steigerung der Biegezugfestigkeit zu beobachten, Probe C weist eine Steigerung von etwa 33 % auf. Die starke Zunahme der Festigkeiten bei dieser Probe hebt sich von den Ergebnissen der anderen Proben ab. Die Annahme liegt nahe, dass der hohe Anhydritgehalt des Compound C einen zusätzlichen negativen Einfluss ausübt, welcher sich stärker auf den Mörtel unter Verwendung der GK B - auswirkt im Vergleich zu GK D -. In der Längenänderungs-messung in der Schwindrinne wird dieselbe starke Differenz bei den entsprechenden Proben festgestellt. Dort nimmt die Längenänderung unter der Verwendung von GK D - um ca. 50 % im Vergleich zu GK B - ab.

Dennoch ist die Probe mit dem Compound C auch in Verbindung mit der GK D - die un-

3. Experimentelle Untersuchungen

günstigste. Am vielversprechendsten ist der Compound B, da die Prismen die höchsten Festigkeiten und gleichzeitig auch die stabilsten Werte im Vergleich mit den vorherigen Längenänderungsmessungen erreichen. Bei den Proben dieses Compounds liegt zudem kein signifikanter Unterschied zwischen den Ergebnissen mit der GK B - und D - vor. Dieser Zusammenhang ist bereits bei der Ultraschall-Laufzeit-Messung zu erkennen, da dort vergleichbare Gefügedichten erreicht werden.

Eine Tendenz bzgl. eines möglichen Zusammenhangs zwischen Längenänderung und Festigkeitsentwicklung könnte hier zu erkennen sein, da die Proben mit der volumenexpansiveren GK B - niedrigere Festigkeiten erreichen, als die entsprechenden Proben mit der GK D -, abgesehen von der Probe mit dem Compound A. Da die Festigkeitsergebnisse beim Compound B allerdings nicht signifikant sind, bedarf es für den Beweis dieses Zusammenhanges noch weiterführende Untersuchungen.

Des Weiteren werden die Standardabweichungen aller Proben aus der Messreihe 1 berechnet und sind in folgenden Tabellen dargestellt:

Tabelle 19: Druckfestigkeiten in [N/mm²] und Standardabweichung [N/mm²] der entsprechenden Mörtelproben

	Compound Sta	Compound A	Compound B	Compound C
Normsand	29,3	15,7	19,5	11,0
B -	20,8	18,2	19,2	7,0
D -	24,3	17,0	20,2	11,7
STABW	4,27	1,25	0,51	2,54

Tabelle 20: Biegezugfestigkeiten in [N/mm²] und Standardabweichung [N/mm²] der entsprechenden Mörtelproben

	Compound Sta	Compound A	Compound B	Compound C
Normsand	7,6	4,4	4,7	4,9
B -	7,2	6,1	5,6	3,3
D -	7,4	5,0	5,2	4,3
STABW	0,20	0,86	0,45	0,81

Die Prismen mit der Standardmischung weisen zwar die niedrigste Standardabweichung mit 0,20 N/mm² bei den Biegezugfestigkeiten auf, allerdings erreicht die Standardprobe bei den Druckfestigkeiten die höchste Standardabweichung mit 4,27 N/mm². Somit erzielen die Proben mit dem Compound B als einziges System sowohl bei der Druck- als auch der Biegezugfestigkeit die stabilsten Werte, da die Standardabweichungen mit 0,51 N/mm² und 0,45 N/mm² sehr gering sind.

3. Experimentelle Untersuchungen

Basierend auf den bisherigen Ergebnissen erweisen sich die Compounds A und B als die Proben mit den besten mechanischen Eigenschaften. Durch den hohen α -HH-Anteil ist ein schneller Hydratationsfortschritt zu verzeichnen. Dennoch sind Unterschiede zwischen diesen beiden Mischungen festzustellen, welche vermutlich mit dem geringen Anteil an NA im Compound A zusammenhängen. Die Proben des Compounds B weisen die höchsten Festigkeitsmittelwerte auf, wobei die Proben des Compounds A teilweise höhere Einzelwerte erzielen. Entscheidend ist aber die niedrige Standardabweichung der Biegezug- und Druckfestigkeiten bei den Proben des Compounds B, wodurch dieses System das stabilere ist und somit auch das vielversprechendste.

Der Compound C ist am ungünstigsten, da die Proben eine sehr langsame Festigkeitsentwicklung und eine sehr poröse Struktur aufweisen. Die Festigkeitswerte sind zudem am niedrigsten und sehr instabil und hängen stark von dem verwendeten Sand ab.

Die Proben mit dem Standard Compound weisen im Vergleich zu den Proben mit den eigens hergestellten Compounds stets höhere Festigkeitswerte auf. Dies ist auf die bessere Homogenität der Frischmörtelmasse und geringere Porosität zurückzuführen. Die Schaumbildung der Proben mit den eigens hergestellten Compounds bewirkt einen negativen Einfluss auf die Festigkeit. Wie mittels Ultraschall-Laufzeit-Messung bereits festgestellt wurde, hat die Porosität allerdings keinen negativen Einfluss auf die Gefügedichte und kann somit nicht mit der Festigkeit gleichgesetzt werden.

Die Abbildungen 35 und 36 zeigen die Mittelwerte der Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben des Standardcompounds und des Compounds B mit jeweils allen GK, zusätzlich GK A +. Der W/B-Wert aller Mörtelproben beträgt 0,47 und das Prüfalter 7 d. Die Zusatzmitteldosierungen der eigens hergestellten Compounds erfolgt entsprechend der Messreihe 1 der Längenänderungsmessung.

3. Experimentelle Untersuchungen

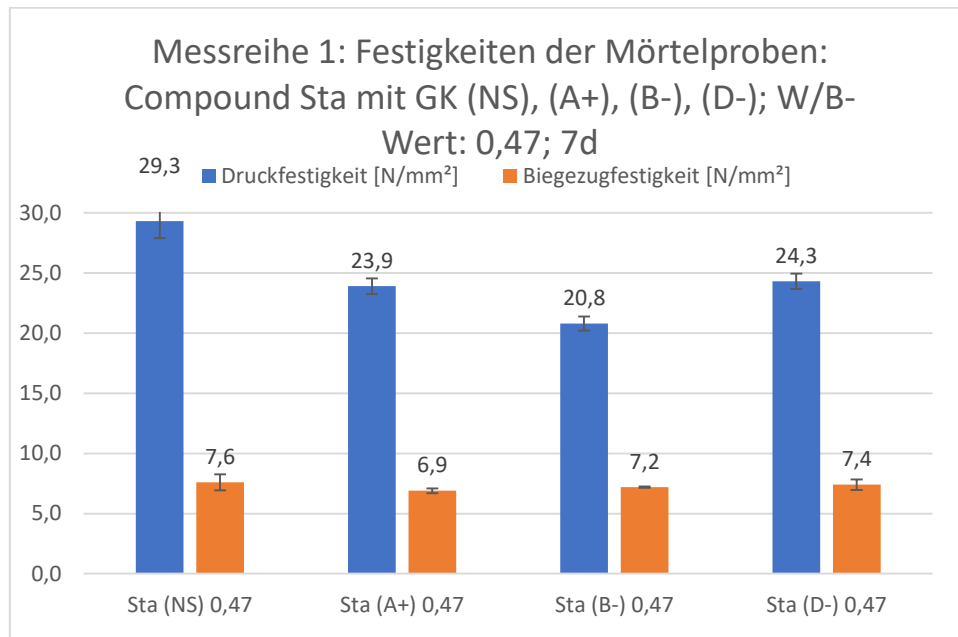


Abbildung 35: Messreihe 1: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; 7d

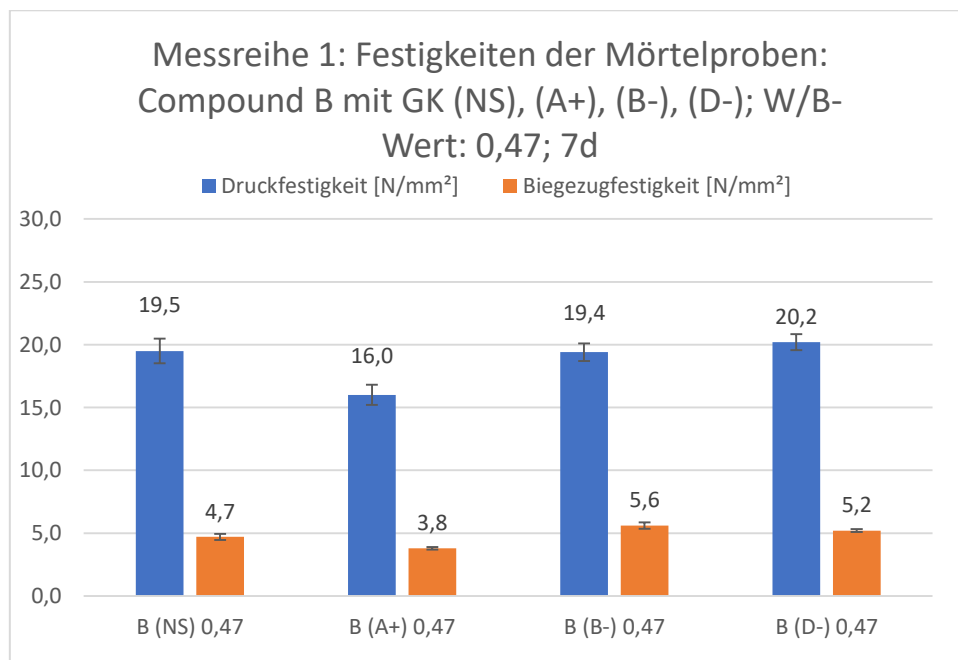


Abbildung 36: Messreihe 1: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound B mit GK (NS), (A+), (B-), (D-); W/B-Wert: 0,47; 7d

Auffällig sind vor allem die beiden Proben mit der GK A+. Beim Compound B sorgt sie für die niedrigste Druck- und Biegezugfestigkeit, wohingegen die Festigkeiten der Standardprobe mit der GK A+ mit der Probe Sta (D-) zu vergleichen ist.

Zwar erzielen die Standardproben tendenziell höhere Festigkeitswerte, allerdings ist der Abfall der Festigkeiten im Vergleich zu der Probe mit dem Normsand sehr hoch (bis zu

3. Experimentelle Untersuchungen

30 %). Hingegen sind bei den Proben mit dem Compound B, abgesehen bei der GK A +, keine Festigkeitsminderungen zu verzeichnen.

Anzunehmen wäre, dass der Stabilisierer im Standardcompound in Verbindung mit der GK A + einen positiven Einfluss auf die Festigkeit ausübt, da er für ein homogeneres Gefüge sorgt. Theoretisch werden von der GK A + keine bzw. nur sehr geringe volumenexpansive Reaktionen ausgelöst, welche wie vorab beschrieben, das freie Wasser benötigen, welches vom Stabilisierer eingebunden wird, um noch schadensfrei im plastischen Zustand ablaufen zu können. Daher kommt nur an dieser Stelle die positive Wirkung des Stabilisierers zum Tragen.

Beim Compound B ist kein Stabilisierer vorhanden, somit kommt es bei der Herstellung der Prismen zu einem geringen Bluten an der Oberfläche. Die oberste Schicht ist folglich frei von Gesteinskörnung und somit wird die Festigkeit verringert. In der Praxis könnte dieses Defizit durch Anschleifen der Estrichoberfläche allerdings behoben werden. Zudem wäre der Einsatz von Entschäumern denkbar.

Bei den beiden GK B - und D - findet dieser Prozess zwar auch statt, doch an dieser Stelle könnte das Fehlen des Stabilisierers beim Compound B dem Längenänderungsverhalten zugutekommen.

Zuletzt wird in dieser Messreihe der Einfluss des Probealters untersucht. Dies ist vor allem bei der Probe mit dem Bindemittel C von Bedeutung, da aufgrund des Anhydritgehalts längere Abbindezeiten vorliegen als bei den Bindemitteln A und B. Ermittelt werden die Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben mit den Compounds B und C und der GK B -.

Der W/B-Wert aller Mörtelproben beträgt 0,47 und das Prüfalter 7 d bzw. 21 d. Die Zusatzmitteldosierungen der eigens hergestellten Compounds erfolgt entsprechend der Messreihe 1 der Längenänderungsmessung.

3. Experimentelle Untersuchungen

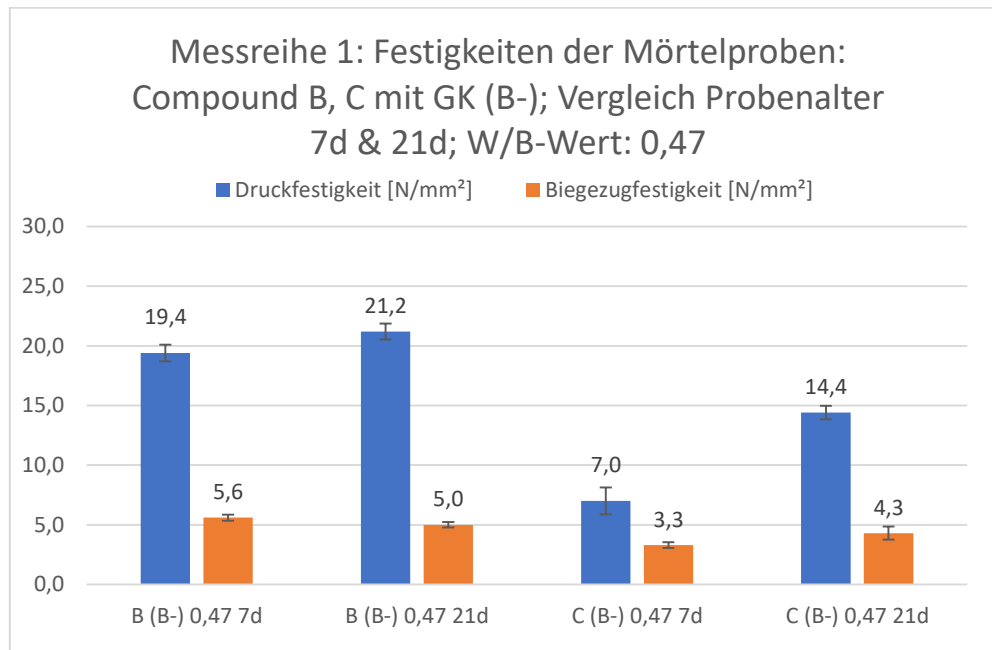


Abbildung 37: Messreihe 1: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound B, C mit GK (B-); Vergleich Probenalter 7d/21d; W/B-Wert 0,47;

Tendenziell steigen die Festigkeiten bei den untersuchten Proben mit zunehmendem Alter. Lediglich die Biegezugfestigkeit der Probe B (B-) nimmt mit Zunahme des Alters geringfügig ab.

Die Zunahme der Festigkeit ist bei der Probe mit dem Compound C allerdings intensiver als bei der Probe mit dem Compound B. Die Druckfestigkeit wird bei C (B-) verdoppelt, die Biegezugfestigkeit steigt um knapp 25 %. Bei der Probe B (B-) steigt die Druckfestigkeit hingegen nur um etwa 9 % an.

Durch den hohen Anhydritgehalt unterliegt das Bindemittel C einem längeren Hydratationsprozess, dementsprechend verbessert sich die Festigkeit dieser Probe viel intensiver mit zunehmendem Alter als bei der Probe mit dem Bindemittel B. Der hohe Anteil an α -HH löst eine schnelle Verfestigung aus, die nach 7 d nur noch in einem sehr geringen Maße zunimmt.

Dennoch entspricht die Druckfestigkeit nach 21 d der Mörtelprobe C (B-) nur 75 % der Druckfestigkeit nach 7 d der Mörtelprobe B (B-). Eigenschaften wie eine lange Abbindezeit in Verbindung mit niedrigen Festigkeiten und eine hohe Längenzunahme schließen das Bindemittel C zur Verwendung von CAF aus.

Für die nächsten Messreihen wird aus Zeitgründen bevorzugt mit dem Compound B gearbeitet.

Die Abbildung 38 zeigt die Mittelwerte der Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben der Compounds A und B, jeweils mit der GK B - und GK D - (nur Compound B) unter

3. Experimentelle Untersuchungen

Verwendung unterschiedlicher Verzögerer (siehe Messreihe 2, Kapitel 3.4.1). Der W/B-Wert aller Mörtelproben beträgt 0,47 und das Prüfalter 7 d. Die Zusatzmitteldosierungen der eigens hergestellten Compounds erfolgt entsprechend der Messreihe 2 der Längenänderungs-messung.

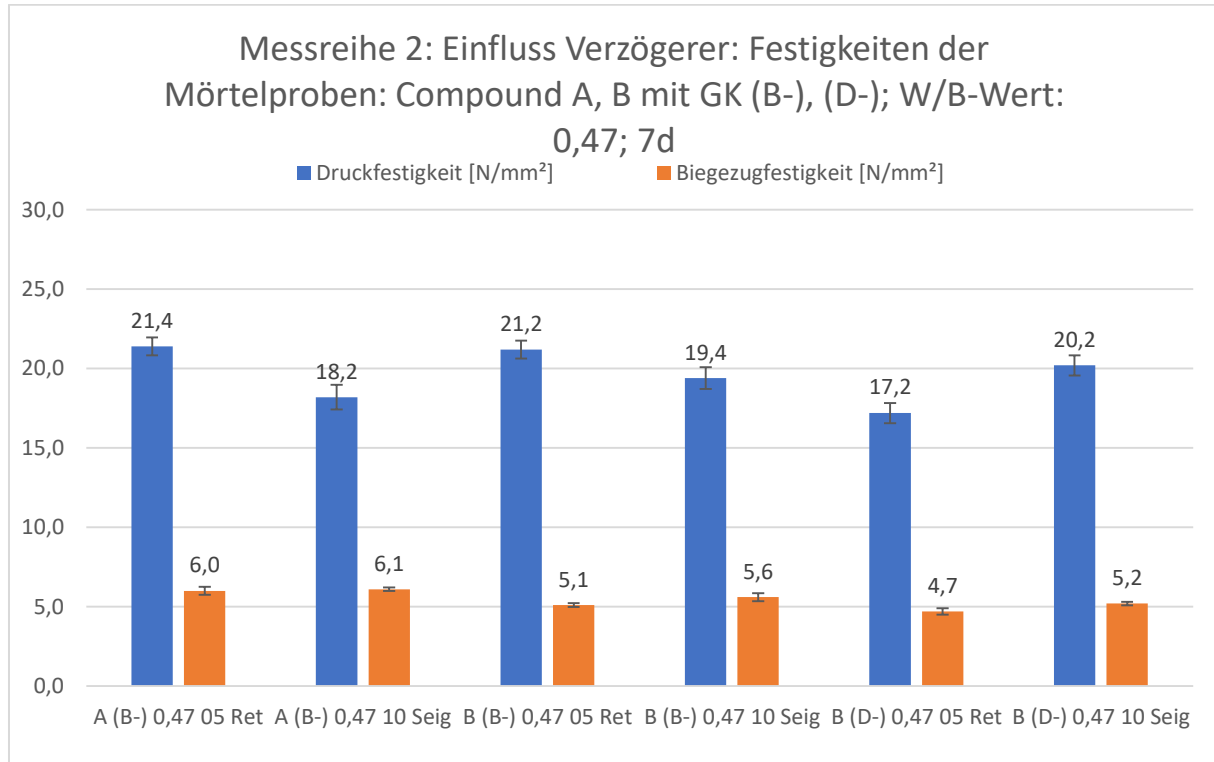


Abbildung 38: Messreihe 2: Einfluss Verzögerer: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound A, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d

Diese Untersuchung macht deutlich, dass der Einfluss des Zusatzmittels unterschiedliche Auswirkungen auf die Festigkeit in Abhängigkeit von der jeweiligen Gesteinskörnung haben kann. Bei der Probe B (D-) verbessern sich die Festigkeitswerte unter Verwendung des Seignettensalzes. Bei den Proben mit der Gesteinskörnung B - verbessern sich lediglich die Biegezugfestigkeiten minimal, die Druckfestigkeiten verschlechtern sich bei beiden Proben mit den Compounds A und B.

Zudem wird auch an dieser Stelle deutlich, dass ein positives Längenänderungsverhalten nicht in einen direkten Zusammenhang mit hohen Festigkeitswerten zu bringen ist, da das Seig-nettensalz bei der Probe mit dem Compound A mit der Gesteinskörnung B - zwar geringere Längenänderungswerte, gleichzeitig aber niedrigere Festigkeiten hervorbringt. Bei der GK D - wirkt sich das Seignettensalz allerdings positiv auf die Festigkeitsentwicklung aus, bei den entsprechenden Ergebnissen der Längenänderung kann bei der Probe mit dem Compound B und der GK D - unter Verwendung der unterschiedlichen VZ allerdings kein signifikanter Einfluss festgestellt werden.

3. Experimentelle Untersuchungen

Ebenso kann auch bei der Probe mit dem Compound B unter der Verwendung der GK B - bei der Längenänderung kein Einfluss der VZ-Art festgestellt werden, obwohl das Retardan hier für bessere Druckfestigkeiten sorgt.



Abbildung 39: Prismen Probe A (B-), B (B-), B (D-) mit 0,05 % Retardan; W/B-Wert 0,47; nach Entschalung; links Prismenoberfläche, rechts entsprechende Seitenfläche

Die Proben unter Verwendung des Retardans sind bezüglich ihrer Porosität und Fleckenbildung an der Prismenoberfläche vergleichbar mit den Proben unter Verwendung des Seignettensalzes. Die Entmischungsneigung wird durch das Retardan in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung allerdings verstärkt, sodass an den Proben mit der Gesteinskörnung B - sehr starke Farbveränderungen an der Oberfläche auftreten, welche bei Verwendung des Seignettensalzes nicht festgestellt werden. Nur bei der Probe mit der Gesteinskörnung D - kann keine Farbveränderung festgestellt werden, die Mörtelmasse ist im frischen Zustand auch homogen und am besten verarbeitbar.

Auch wenn für die Reaktionsmechanismen der Längenänderung dieser Messreihe primär der VZ (vor allem Retardan) und das BM (Compound A mit NA Anteil) von Bedeutung sind, ist für die Festigkeitsentwicklung die Art der GK entscheidend. Die Probe mit der GK D - erzielt bessere Festigkeiten mit dem Seignettensalz, die Proben mit der GK B - hingegen mit dem Retardan, unabhängig welches BM eingesetzt wird. Um diese Aussage sicher belegen zu können, wären weitere Prüfungen mit allen Compounds und Gesteinskörnungen vonnöten.

Die Abbildung 40 zeigt die Mittelwerte der Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben

3. Experimentelle Untersuchungen

der Compounds A und B, jeweils mit der GK B - und GK D - (nur Compound B) unter Verwendung unterschiedlicher Fließmittel (siehe Messreihe 3, Kapitel 3.4.1). Der W/B-Wert aller Mörtelproben beträgt 0,47 und das Prüfalter 7 d. Die Zusatzmitteldosierungen der eigens hergestellten Compounds erfolgt entsprechend der Messreihe 3 der Längenänderungs-messung.

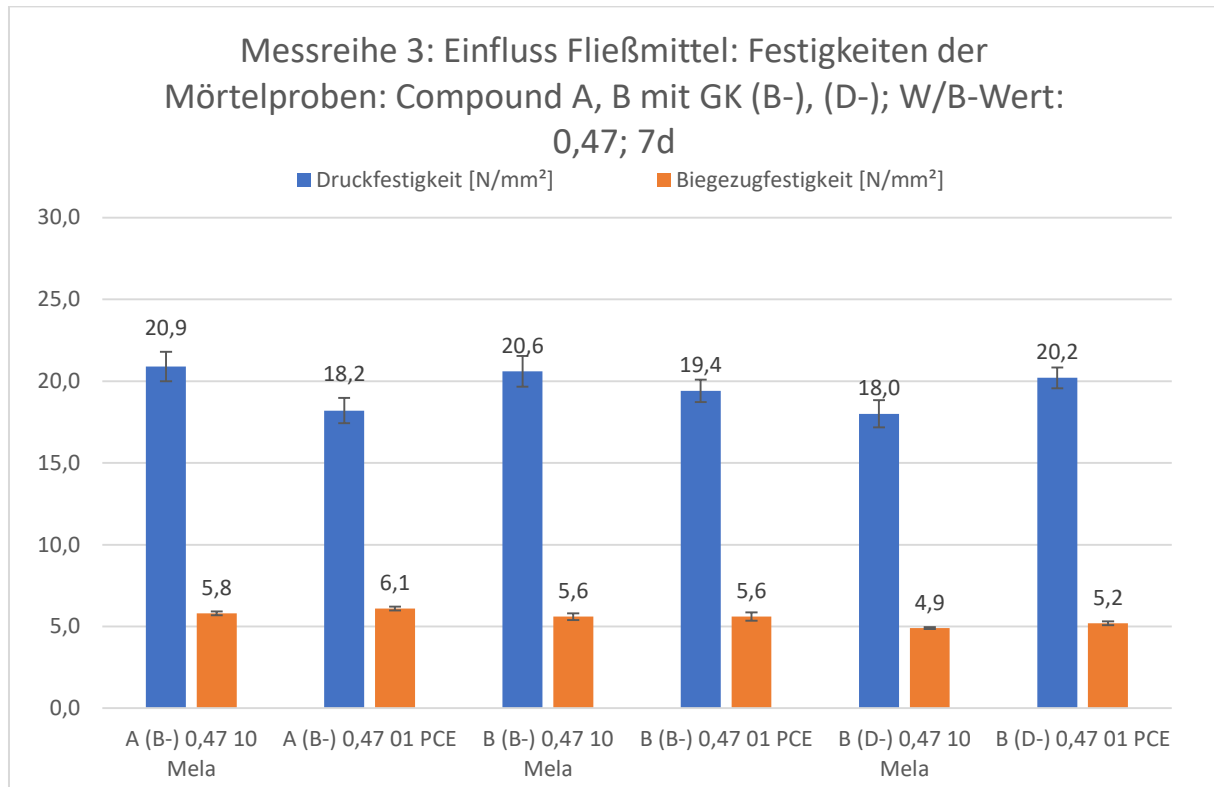


Abbildung 40: Messreihe 3: Einfluss Fließmittel: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound A, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert 0,47; Prüfalter 7d

In Abhängigkeit von der jeweiligen GK verbessert bzw. verschlechtert sich die Druckfestigkeit durch die Verwendung von Melaminharz. Die Proben mit der GK B - scheinen auf den ersten Blick bessere Druckfestigkeiten zu erzielen, wohingegen die Probe mit der GK D - schlechtere Werte durch das Melaminharz erzielt. Unter Berücksichtigung der Standardabweichung wird ein signifikanter Unterschied nur bei der Probe mit dem Compound A erreicht. Signifikante Unterschiede zwischen den Bindemitteln lassen sich aber nicht feststellen, im Gegensatz zu den Ergebnissen aus der entsprechenden Längenänderungsmessung aus Messreihe 3 (Kapitel 3.4.1). Die Längenänderung nimmt durch die Verwendung des Melaminharzes bei der Probe mit dem Compound A zu, wohingegen beim Compound B kein signifikanter Einfluss festzustellen ist, vergleichbar mit den Ergebnissen aus Messreihe 2. Erneut wird deutlich, dass es keine direkte Korrelation zwischen einem positiven Längenänderungsverhalten und hohen Festigkeiten gibt.

Berücksichtigt werden muss auch die Tatsache, dass die FM unterschiedliche Auswirkungen

3. Experimentelle Untersuchungen

auf die DH-Kristallmorphologie haben. Durch die PCEs werden die Kristalle verkürzt, sodass theoretisch weniger Kontaktstellen untereinander bestehen und somit auch die Festigkeit bei den Proben mit der GK B - negativ beeinflusst werden könnte [10].

Die Biegezugfestigkeiten sind unter der Verwendung des PCE tendenziell höher als beim Melaminharz, die Differenzen sind allerdings so gering, dass eine Signifikanz nicht vorliegt. Somit sind die Ergebnisse vergleichbar mit denen aus der Messreihe 2, da für die Festigkeitsentwicklung unter Verwendung unterschiedlicher Zusatzmittel-Arten die Art der GK einen entscheidenden Einfluss ausübte. Auch dort bewirkte die GK D - im Vergleich zur GK B - einen gegenteiligen Effekt unter der Verwendung eines anderen Zusatzmittels.

Die Abbildung 41 zeigt die Mittelwerte der Druck- und Biegezugfestigkeiten der Mörtelproben der Compounds Sta und B, jeweils mit der GK B - und GK D - (nur Compound B) unter Verwendung unterschiedlicher W/B-Werte (siehe Messreihe 4, Kapitel 3.4.1). Das Prüfalalter beträgt 7 d und die Zusatzmitteldosierungen der eigens hergestellten Compounds erfolgt entsprechend der Messreihe 4 der Längenänderungsmessung.

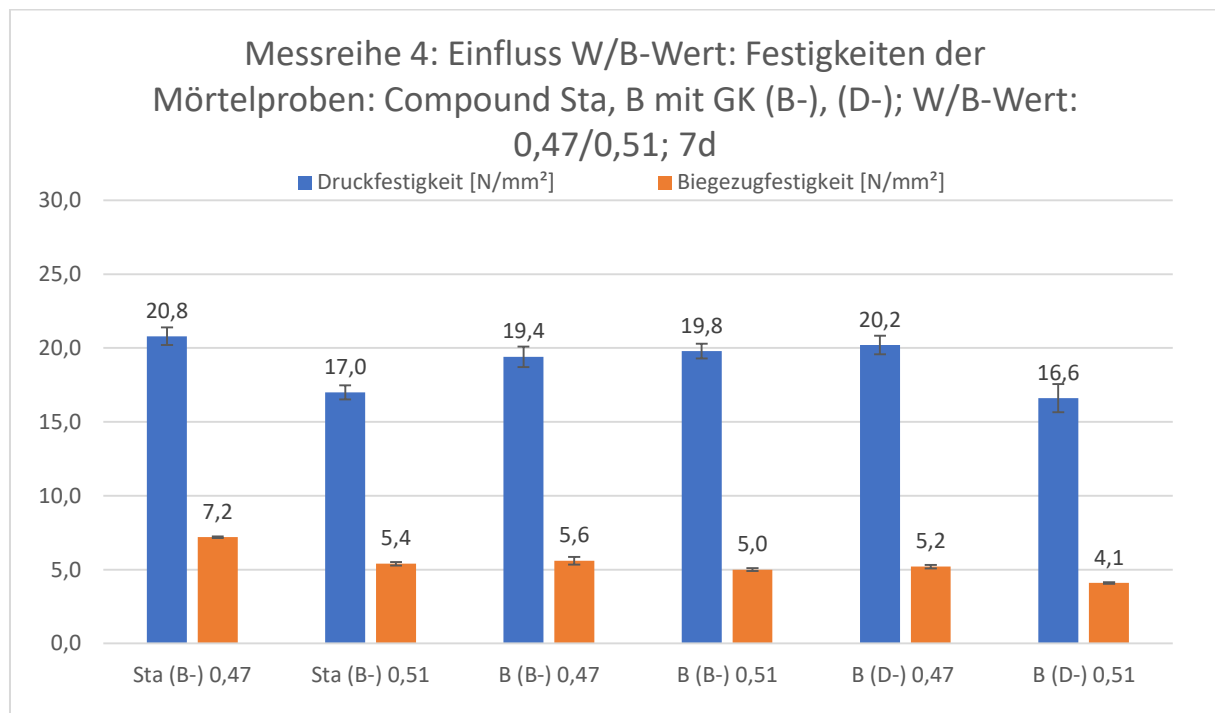


Abbildung 41: Messreihe 4: Einfluss W/B-Wert: Festigkeiten der Mörtelproben: Compound Sta, B mit GK (B-), (D-); W/B-Wert 0,47/0,51; Prüfalter 7d

Alle Mörtelproben zeigen wie erwartet eine Verschlechterung aller Festigkeitswerte in Korrelation mit einem erhöhten W/B-Wert (Abweichung Probe B (B-) 0,47/0,51 nicht im Rahmen der Messgenauigkeit). Der hohe W/B-Wert verursacht eine erhöhte Anzahl an Kapillarporen im Gefüge, welche einen negativen Einfluss auf die Druck- und Biege-

3. Experimentelle Untersuchungen

zugfestigkeiten ausüben.

Unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Ergebnisse der Längenänderungsmessung ist abschließend zu sagen, dass ein gutes Längenänderungsverhalten nicht mit einer hohen Festigkeit gleichzusetzen ist. Lediglich ist dieser Zusammenhang im Vergleich der Proben mit der GK B - mit der GK D - zu vermuten, da die Proben mit der GK B - eine stärkere Volumen-expansion bei niedrigeren Festigkeiten als die Proben mit der GK D - aufweisen. Diese Tat-sache trifft allerdings nur bei drei der vier untersuchten Proben zu.

Durch die Variation von Zusatzmitteln wird ein bedeutender Einfluss ausgeübt, welcher den vermeintlichen direkten Zusammenhang hinfällig macht. Es finden in diesen Mörtelsystemen viele unterschiedliche Reaktionen statt, deren Einzelmechanismen nur schwer heraus-zuarbeiten sind. Die verschiedenen Eigenschaften wie Festigkeit und Längenänderungs-verhalten werden jeweils durch andere Parameter beeinflusst, wie vor allem die Messreihen 2 und 3 verdeutlicht haben. Durch die Veränderung einzelner Variablen sind im Rahmen dieser Arbeit zwar Hypothesen aufstellbar, allerdings bedarf ihr Beweis weiterer Untersuchungen.

4. Zusammenfassung

In einer vorangegangenen wissenschaftlichen Kollegarbeit wurde ein marktüblicher Calciumsulfat-Fließestrich-Compound (in dieser Arbeit als Referenzprobe bezeichnet) untersucht, welcher in Verbindung mit vorgegebenen Gesteinskörnungen bauteilschädigende Volumenexpansionen auslöst. Es wurde der Theorie nachgegangen, dass aus den Gesteinskörnungen Aluminiumkomplexe herausgelöst werden, welche in Verbindung mit dem Compound das Treibmineral Ettringit bilden können, welches diese Volumenexpansionen bewirkt. Diese Theorie konnte im Rahmen des wissenschaftlichen Kollegs allerdings nicht als alleiniger Reaktionsmechanismus bestätigt werden. Die festgestellte Längenzunahme müsste folglich von mehreren Faktoren beeinflusst werden.

Die Zielstellung dieser Masterarbeit war es, ein volumenstabiles Calciumsulfat-Bindemittelsystem zu konfektionieren, welches in der Lage ist, die Volumenexpansionen in Verbindung mit diesen Gesteinskörnungen im Fließestrichmörtel zu unterbinden. Gleichzeitig dienen die Untersuchungen an den eigens hergestellten Bindemittelsystemen dazu, die Reaktionsmechanismen genauer zu differenzieren. Vergleichend dazu werden weitere Untersuchungen an den vorgegebenen Referenz- und Standardcompounds durchgeführt, welchen werksintern unbekannte Additivrezepturen zugesetzt wurden. Lediglich das Fehlen des Verzögerers beim Standardcompound ist bekannt.

Im Rahmen dieser Arbeit war es möglich, ein Bindemittelsystem herzustellen, welches diese Längenzunahme unterbindet. Die Bindemittel A und B, welche zu 80 % aus α -Halbhydrat und zu 20 % aus Anhydrit II bestehen und somit das gleiche Verhältnis der Bindemittelkomponenten wie die Referenz- und Standardprobe besitzen, erfüllen die Eigenschaft, in der Verbindung mit den als kritisch eingestuften Gesteinskörnungen B und D, einen volumenstabilen Fließestrichmörtel herzustellen. Für diese Bindemittel werden im Rahmen von Voruntersuchungen, durch Fließmaß- und Erstarrungsbeginn-Analysen, eine geeignete Additivzusammensetzung bestimmt, die für das Erfüllen dieser Eigenschaft maßgeblich ist. Folglich kann im Rahmen der Untersuchungen dieser Arbeit angenommen werden, dass für die Volumenexpansionen der Referenz weniger das Bindemittel entscheidend ist, als die Additivkomponente.

Durch Längenänderungsmessungen in der Schwindrinne werden die Einflüsse der Bindemittel, der Additivzusammensetzungen und der W/B-Werte auf das Längenänderungsverhalten untersucht, um nicht nur den stabilsten Compound zu ermitteln, sondern auch die Ursachen des starken Expansionsverhaltens der Referenz- und Standardcompounds näher eingrenzen zu können. Da eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren Einfluss auf die Volumenexpansion ausüben, können durch das Verändern einzelner Variablen erste Kenntnisse über

4. Zusammenfassung

die stattfindende Reaktion gewonnen werden.

Als stabilster Compound mit den vielversprechendsten Ergebnissen stellt sich das Bindemittel B heraus. Die Anhydrit II-Komponente besteht, im Vergleich zum Bindemittel A, aus 20 % Thermoanhydrit, wohingegen das Bindemittel A 15 % Thermoanhydrit und 5 % Naturanhydrit enthält. Durch den Anteil an Naturanhydrit, welcher wiederum Calciumsulfat-Dihydrat enthält, reagiert das Bindemittel empfindlicher beispielsweise auf Änderungen der Additivart. Sobald ein Zusatzmittel eingesetzt wird, welches eine geringere verzögernde Wirkung besitzt als das zuvor eingesetzte (Melaminharz statt PCE oder Retardan statt Seignettensalz), erreicht die Mörtelprobe des Bindemittels A bei den Längenänderungsmessungen Werte, die die Norm-toleranz von 0,20 mm/m überschreiten. Beim Bindemittel B wirkte sich die Änderung nicht auf die Längenzunahme aus, die Werte liegen bei diesen Mörtelproben stets im Toleranzbereich.

Bei den Festigkeitsuntersuchungen der Messreihe 1 liegen die Druckfestigkeitswerte der Mörtelprobe mit dem Bindemittel A stets unter denen mit dem Bindemittel B und auch die Standardabweichungen der Proben A überschreiten die der Proben B bei weitem. Aufgrund dessen wird der Schwerpunkt der darauffolgenden Analysen der Gefügeentwicklung und des Hydratationsprozesses auf das Bindemittel B gesetzt.

Das Bindemittel C besteht aus 80 % Anhydrit II und 20 % α -Halbhydrat. Der hohe Anhydrit II-Gehalt bewirkt einen verlangsamten Hydratationsprozess und einer damit einhergehenden schwachen Gefügeverdichtung. Angenommen wird, dass die Dihydrat-Kristalle, welche sich aus der Anhydrit II Komponente bilden, gegen die bereits gebildeten Dihydrat-Kristalle aus der α -Halbhydrat-Komponente drücken könnten und somit nicht nur das Gefüge schädigen, sondern auch die Volumenexpansion begünstigen. Allerdings bedarf es weitere Untersuchungen, um diese Annahme zu bestätigen.

Diese ungünstige Eigenschaft des Bindemittels C stellt sich bereits bei den Längenänderungsuntersuchungen heraus, sodass das Bindemittel für den potentiellen Einsatz im CAF früh ausgeschlossen werden kann. Aufgrund der Differenzen in der Gefügestruktur und im Hydratationsprozess zum Bindemittel B wird das Bindemittel C allerdings für weitere Untersuchungen als Vergleichsprobe analysiert, beispielsweise bei der Ultraschall-Laufzeit-Messung.

Primär werden bei den Analysen zum Hydratationsprozess mittels Kalorimetrie und der Gefügeentwicklung mittels Ultraschall-Laufzeit-Messung die Proben mit dem Referenzcompound (mit Verzögerer), Standardcompound (ohne Verzögerer) und Compound B untersucht.

Aus der Kalorimetrie geht hervor, dass die Wärmeentwicklung der Referenzprobe später einsetzt als die der Probe mit dem Compound B. Bei der Standardprobe hingegen setzt die

4. Zusammenfassung

Wärmeentwicklung durch das Fehlen des Verzögerers im Vergleich zur Probe mit dem Compound B früher ein.

Bei der Probe B und der Referenzprobe wird die Wärmeentwicklung in Abhängigkeit an die jeweiligen Gesteinskörnungen qualitativ beeinflusst. Die kritischen Gesteinskörnungen lösen eine verfrühte Wärmeentwicklung bei den Proben aus, somit auch eine verfrühte Hydratation.

Bei der Standardprobe ist allerdings nur ein quantitativer Einfluss auf die Wärmeentwicklung durch die kritischen Gesteinskörnungen erkennbar. Durch das Fehlen des Verzögerers ist keine Induktionsperiode festzustellen, der Abbindeprozess scheint unmittelbar nach dem Anmischen des Frischmörtels zu beginnen.

Dies ist auch bei der Ultraschall-Laufzeit-Messung erkennbar, das Gefüge verdichtet sich bei den Proben mit den Compounds Referenz und B unter der Verwendung der kritischen Gesteinskörnungen B und D früher als mit Normsand. Zudem wird die Gefügeentwicklung zusätzlich beschleunigt, bei der Probe B allerdings intensiver als bei der Referenzprobe.

Bei der Probe mit dem Standardcompound und der kritischen Gesteinskörnung B hingegen wird im Vergleich zur entsprechenden Normsandprobe eine verlangsamte Zunahme der Gefügedichte festgestellt, dort scheint das Fehlen des Verzögerers einen gegenteiligen Einfluss auf die Gefügeentwicklung auszuüben.

Zudem werden im Rahmen dieser Arbeit Unterschiede zwischen den einzelnen Gesteinskörnungen erkennbar. Die kritische Gesteinskörnung B löst im Vergleich zur kritischen Gesteinskörnung D scheinbar vermehrte und länger andauernde Reaktionsmechanismen aus, die zu stärkeren Längenänderungen führen. Dies ist vor allem bei den Untersuchungen der Messreihe 1 erkennbar, die primär den Einfluss des Bindemittels auf die Volumenexpansion untersuchen.

Die Messreihen 2 und 3 der Längenänderungsuntersuchungen verdeutlichen den Einfluss der Verzögerer-, bzw. Fließmittelart. Diese Untersuchungen zeigen, dass das Bindemittel B bezüglich einer Variation der Additivkomponenten am stabilsten reagiert, da keine Längenänderungen durch die Verwendung eines anderen Verzögerers, bzw. Fließmittels festgestellt werden konnten. Beim Bindemittel A sind allerdings Längenzunahmen durch die Verwendung von Retardan anstelle des Seignettensalzes, bzw. Melaminharz-Fließmittel anstelle des PCEs festzustellen. Vermutlich scheint der Naturanhydrit-Anteil des Bindemittels A ein für die Volumenexpansion notwendiger Reaktionspartner im Rahmen dieser Messreihen zu sein.

Ein denkbarer, noch nicht untersuchter Unterschied, der zwischen den eigens hergestellten

4. Zusammenfassung

Compounds und den beiden Compounds Standard und Referenz vorliegen könnte, ist der Einsatz eines Stabilisierers. In welcher Dosierung und Art dieser vorliegen könnte, ist allerdings nicht bekannt. Ihre Wirkung basiert auf die chemische oder physikalische Bindung von freiem Wasser, wodurch eine Entmischungsneigung und eine bessere Konsistenz ermöglicht wird. Es ist möglich, dass dieses Wasser für die Reaktion zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung vonnöten ist. Kann diese im plastischen Zustand ablaufen, wie das beim Compound B der Fall wäre, könnten Volumenexpansionen verhindert werden. Bei den Compounds der Referenz und des Standards könnte dies bedeuten, dass das freie Wasser erst im erhärteten Zustand durch das Nachlassen der Wirkung des Stabilisierers zur Verfügung gestellt werden würde, sodass die Reaktionen zu bauteilschädigenden Längenzunahmen führen könnten. Dieser Hypothese müsste in weiterführenden Untersuchungen nachgegangen werden.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte ein Compound konfektioniert werden, welcher in Verbindung mit kritisch einzustufender Gesteinskörnung, in der Lage ist, eine Volumenstabilität in einem Calciumsulfat-Fließestrichmörtel zu garantieren. Zudem erfüllt er die Anforderungen nach DIN 13454 bezüglich der Schwindmaßtoleranz von $\leq 0,20$ mm/m, der Verarbeitungszeit ≥ 30 min und des pH-Werts $\geq 7,00$. Die genaue Einordnung in eine Druck- und Biegezugfestigkeitsklasse kann noch nicht erfolgen, da die Klassen auf den Ergebnissen der Festigkeitswerte nach 28 d beruhen. Aller Wahrscheinlichkeit nach würden die jeweiligen Festigkeitsklassen aber in dem empfohlenen Bereich nach DIN liegen, da bereits die 7 d Werte die Mindestwerte überschreiten.

Von primärer Bedeutung ist aber die Tatsache, dass die Proben mit dem Compound B von der Art der eingesetzten Gesteinskörnung, dem Wasseranteil und der Art des Verzögerers oder Fließmittels nur minimal, bzw. gar nicht beeinflusst werden und die Auswirkungen stets im Rahmen des Toleranzbereichs bleiben. Somit erfüllt dieser Compound alle geforderten Eigenschaften und wäre für den Einsatz im Calciumsulfat-Fließestrich geeignet.

Ausblick

Abschließend ist zu sagen, dass im Rahmen dieser Arbeit die Zielstellung, ein Calciumsulfat-Bindemittelsystem zu konfektionieren, welches die Eigenschaft besitzt, volumenstabil zu sein, erfüllt wurde. Allerdings müssen sowohl die Mörtелеigenschaften der eigens hergestellten Compounds weiter optimiert werden, als auch weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden, welche die Reaktionsmechanismen im Calciumsulfat-Fließestrich weiter aufklären. Sinnvoll wären folgenden Maßnahmen:

4. Zusammenfassung

- Optimierung Frischmörteleigenschaften des eigens hergestellten Compounds
→ Reduzieren Schaumbildung/Sedimentationsneigung, z.B. durch Einsatz Entschäumer

- Überprüfung Einfluss Stabilisierer bei Referenzprobe
→ Längenänderungsmessung der Referenz ohne Stabilisierer

- Überprüfung Einfluss weiterer Additivarten auf Compound B
→ Längenänderungsmessung mit Compound B und weiteren Variationen der Additivart

- Weitere Überprüfungen Einfluss der Gesteinskörnung auf Hydratation
→ Wiederholung Hydratationsgrad-Bestimmung, weitere Proben quantitative XRD

- Weitere Untersuchungen hinsichtlich Gefügestruktur
→ ESEM-Aufnahmen

Die angewandten Untersuchungsmethoden eignen sich überwiegend sehr gut für zukünftige Qualitätsüberprüfungen im Werklabor. Berücksichtigt werden muss allerdings die Messdauer in der Schwindrinne, da dort eine Mindestmessdauer von 7 d als sinnvoll erscheint. Zwar werden sich die Längenzunahmen der Proben mit dem Referenz- und Standardcompound zu dem Zeitpunkt vermutlich noch keinem Wert angenähert haben, dennoch ist zu erkennen, ob die Normtoleranz eingehalten wird.

Parallel dazu hat es sich als praktisch ergeben, eine Mörtelmasse für mehrere Untersuchungen, wie beispielsweise Schwindrinnenmessung und Festigkeitsprüfung oder Ultraschall-Laufzeit und Kalorimetrie anzufertigen und diese Untersuchungen parallel durchzuführen. Die Dosierung der jeweiligen Additive der Compounds ist sehr zeitaufwändig, somit könnte durch die Maßnahme viel Zeit eingespart werden.

Durch die kurze Messdauer von 8 h sind die Untersuchungsmethoden der Kalorimetrie und der Ultraschall-Laufzeit-Messung sehr gut anwendbar, um kurzfristig Aussagen über den Hydratationsprozess und die Gefügeentwicklung zu erhalten.

Auch die Untersuchungen am Frischmörtel, wie der Fließmaß- und Vicat-Versuch sind im Vergleich zur Schwindrinnen-Messung kaum zeitintensiv und die Einflüsse der Zusatzmittel sind bereits in diesem Mörtelzustand erkennbar.

4. Zusammenfassung

5. Literaturverzeichnis

- [1] Altmann, H.-D.; Hausmann, G. F. (Hrsg.): Vorbereitung von Estrichen für Bodenbelagarbeiten. Calciumsulfatgebundene Fließestriche und Zementestriche im Vergleich. BDM, Duisburg, 1998.
- [2] Benedix, R.: Bauchemie für das Bachelor-Studium. Modern - Kompetent - Kompakt. Lehrbuch. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [3] Bundesverband der Gipsindustrie e.V.: Gips-Datenbuch (2013).
- [4] Christoph Hesse: Der Reaktionsverlauf der frühen Hydratation von Portlandzement in Relation zur Temperatur. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität, Naturwissenschaftliche Fakultät, Erlangen-Nürnberg, 2009.
- [5] Daniel Bülichen: Wirkmechanismus verschiedener Celluloseether als Wasserretentionsmittel in der Tiefborhzementierung und in Trockenmörtelsystemen. Dissertation, Technische Universität München, Bauchemie, München, 2013.
- [6] Dr. Matthias Buchert, Jürgen Sutter, Holger Alwast, Nadja Schütz, Dr. Karin Weimann: Ökobilanzielle Betrachtung des Recyclings von Gipskartonplatten (2017).
- [7] F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde: Übungen Materialanalytik. Übungsanleitung, Bauhaus Universität Weimar, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar, 2017.
- [8] Fischer, H.-B.; Matthes, C. (Hrsg.): Tagungsbericht. 3. Weimarer Gipstagung, 14.-15. März 2017, Weimar, Bundesrepublik Deutschland = 3. Weimar Gypsum Conference. Bauhaus-Universität, Weimar, 2017.
- [9] Fischer, H.-B.; Stark, J. (Hrsg.): Literaturstudie. Fliessestrich. Weimar, 1998.
- [10] Förthner, S.: Kristallisation und Morphologiebeeinflussung bei Gipsen. Untersuchungen zur Steuerung der makro-physikalischen Eigenschaften, Zugl.: Erlangen, FAU, Diss., 2011.
- [11] Freyer, D.; Voigt, W.: Crystallization and Phase Stability of CaSO_4 and CaSO_4 – Based Salts. Monatshefte für Chemie / Chemical Monthly 134 (2003), Heft 5, S. 693–719.
- [12] Henning, O.; Knöfel, D.; Stephan, D.: Baustoffchemie. Eine Einführung für Bauingenieure und Architekten. Beuth Studium. Beuth Verlag GmbH, s.l., 2014.
- [13] IGE Calciumsulfat, IWM Industrieverband Werkmörtel: Calciumsulfat-Fließestrich. Zukunft schon heute. Merkblatt (2016).
- [14] InformationsZentrum Beton GmbH; Erkrath / www.beton.org: Zement Merkblatt: Betonzusätze; Zusatzmittel und Zusatzstoffe (2014).

5. Literaturverzeichnis

- [15] Klöcker, H. S.: Hydratationskinetik und Kristallisationsdruck im System $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$, @Aachen, Techn. Hochsch., Fak. für Bergbau u. Hüttenwesen, Diss., 1979.
- [16] LANXESS: Datenblatt Calciumsulfatfließestrich. Estrich-Programm.
- [17] Lorenz, W.; Gwosdz, W.: Gesteinskörnungen : Kies, Sand und gebrochener Naturstein ; mit 125 Tabellen. [Geologisches Jahrbuch / H] Geologisches Jahrbuch. Schweizerbart, Stuttgart, 2002.
- [18] Mallon, T.: Bauchemie. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2005.
- [19] Müller, A.: Das Sulfatproblem. Gipsabfälle. RECYCLING magazin (2012), Heft 22.
- [20] Müller, A.; Linß, E.; Schulz, T.: Vom Störstoff zum Rohstoff. Baustoffrecycling. RECYCLING magazin (2011), Heft 09.
- [21] Müller, M.: Die Abbindebeschleunigung von Stuckgips durch Calciumsulfatdihydrat, Zugl.: Weimar, Bauhaus-Univ., Diss, 2007. Kassel Univ. Press, Kassel, 2007.
- [22] Niemann, L.: Die Reaktionskinetik des Gipsabbindens. Makroskopische Reaktionsraten und Mechanismen im molekularen Maßstab. Karlsruher Mineralogische und Geochemische Hefte (2004), Band 28.
- [23] Pfoh, S.; Grimm, F.; Schneider, P.: Projektplattform Energie. Leitfaden Ökologische Kenndaten Baustoffe und Bauteile (2015).
- [24] Piethe, V.: Nachweis einer Ettringitbildung im Calciumsulfat-Fließestrich aufgrund toniger Verunreinigungen der Gesteinskörnung und damit einhergehender Volumenexpansion. wissenschaftliches Kolleg, Bauhaus Universität Weimar, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Weimar, 2018.
- [25] Schlupeck, B.: Weg von der Deponie. Gipsrecycling. RECYCLING magazin (2012), Heft 22.
- [26] Schnell, W.: Das Trocknungsverhalten von Estrichen. Beurteilung und Schlussfolgerungen für die Praxis. Rainer Oswald AlBau (1994).
- [27] Seidler, C.; Spiegel Online; Hamburg: Rohstoffabbau in Thüringen: Gips doch gar nicht! <http://www.spiegel.de/wissenschaft/mensch/thueringen-gips-abbau-im-suedharz-sorgt-fuer-zoff-a-1081600.html> (Abruf: 23.04.2018).
- [28] Thomaseth, D.: Fließestrich unter Verwendung aufbereiteter Rohstoffe, Diplomarbeit, LFU Innsbruck (2002).
- [29] Timm, H.: Estriche und Bodenbeläge. Arbeitshilfen für die Planung, Ausführung und Beurteilung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2013.
- [30] Wiegrink, K.-H.: Modellierung des Austrocknungsverhaltens von Calciumsulfat-Fließestrichen und der resultierenden Spannungen und Verformungen. München, Techn. Univ.,

5. Literaturverzeichnis

Diss., 2002.

Normen

- [N1] DIN EN 196-1:2016-11; Prüfverfahren für Zement - Teil 1: Bestimmung der Festig-keit
- [N2] DIN EN 1045-1:2008-08; Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion
- [N3] DIN 4226-1:2001-07: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen
- [N4] DIN EN 12620:2013-07: Gesteinskörnungen für Beton
- [N5] DIN EN 13454-1:2005-01: Calciumsulfat-Binder, Calciumsulfat-Compositbinder und Calciumsulfat-Werkmörtel für Estriche - Teil 1: Begriffe und Anforderungen
- [N6] DIN EN 13454-2:2007-11: Calciumsulfat-Binder, Calciumsulfat-Compositbinder und Calciumsulfat-Werkmörtel für Estriche - Teil 2: Prüfverfahren
- [N7] DIN EN 13813:2003-01: Estrichmörtel, Estrichmassen und Estriche - Estrichmörtel und Estrichmassen - Eigenschaften und Anforderungen
- [N8] DIN 18202:2005-10: Toleranzen im Hochbau - Bauwerke
- [N9] DIN 18353:2016-09: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen - Estriche
- [N10] DIN 18365:2016-09: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen - Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen – Bodenbelagsarbeiten
- [N11] DIN 18560-1:2015-11: Estriche im Bauwesen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Prüfung und Ausführung

6. Anhang

Anhang 1 – Probenbezeichnung

Tabelle 21: Probenbezeichnung Hauptuntersuchungen

Probenbezeichnung Hauptuntersuchungen

Compound				
Bindemittel	Additive (bzgl. BM)	Gesteinskörnung	W/B-Wert	Bezeichnung
Standard: 80 % α -HH 20 % A II	- genaue Dosierung unbekannt - enthält keinen Verzögerer	Normsand A + B - D -	0,47	Sta (NS) 0,47 Sta (A+) 0,47 Sta (B-) 0,47 Sta (D-) 0,47
Referenz: 80 % α -HH 20 % A II	- genaue Dosierung unbekannt - enthält Verzögerer	Normsand A + B - D -	0,47	Ref (NS) 0,47 Ref (A+) 0,47 Ref (B-) 0,47 Ref (D-) 0,47
A: 80 % α -HH 15 % TA 5 % NA	Standarddosierung: - 0,75 % K ₂ SO ₄ - 0,10 % CL90 - 0,10 % Seignettensalz - 0,01 % PCE	Normsand A + B - D -	0,47	A (NS) 0,47 A (A+) 0,47 A (B-) 0,47 A (D-) 0,47
B: 80 % α -HH 20 % TA	Standarddosierung: - 0,75 % K ₂ SO ₄ - 0,10 % CL90 - 0,10 % Seignettensalz - 0,01 % PCE	Normsand A + B - D -	0,47	B (NS) 0,47 B (A+) 0,47 B (B-) 0,47 B (D-) 0,47
C: 80 % TA 20 % α -HH	Standarddosierung: - 0,75 % K ₂ SO ₄ - 1,00 % CL90 - 0,10 % Seignettensalz - 0,03 % PCE	Normsand A + B - D -	0,47	C (NS) 0,47 C (A+) 0,47 C (B-) 0,47 C (D-) 0,47

gilt für alle Hauptuntersuchungen abgesehen von der Längenänderungsmessung & Festigkeitsuntersuchungen der **Messreihen 2 + 3**

Tabelle 22: Probenbezeichnung Hauptuntersuchungen Messreihe 2+3

Probenbezeichnung Hauptuntersuchungen Messreihe 2 + 3

Compound				
Bindemittel	Additive (bzgl. BM)	Gesteinskörnung	W/B-Wert	Bezeichnung
A: 80 % α -HH 15 % TA 5 % NA	Standarddosierung: siehe vorherige Tabelle	B -	0,47	A (B-) 0,47 10 Seig
	Dosierung Retardan: - 0,75 % K ₂ SO ₄ - 0,10 % CL90 - 0,05 % Retardan - 0,01 % PCE	B -	0,47	A (B-) 0,47 05 Ret
B: 80 % α -HH 20 % TA	Standarddosierung: siehe vorherige Tabelle	B - D -	0,47	B (B-) 0,47 10 Seig B (D-) 0,47 10 Seig
	Dosierung Retardan: - 0,75 % K ₂ SO ₄ - 0,10 % CL90 - 0,05 % Retardan - 0,01 % PCE	B - D -	0,47	B (B-) 0,47 05 Ret B (D-) 0,47 05 Ret
A: 80 % α -HH 15 % TA 5 % NA	Standarddosierung: siehe vorherige Tabelle	B -	0,47	A (B-) 0,47 01 PCE
	Dosierung Melaminharz: - 0,75 % K ₂ SO ₄ - 0,10 % CL90 - 0,10 % Seignettensalz - 0,10 % Melaminharz	B -	0,47	A (B-) 0,47 10 Mela
B: 80 % α -HH 20 % TA	Standarddosierung: siehe vorherige Tabelle	B - D -	0,47	B (B-) 0,47 01 PCE B (D-) 0,47 01 PCE
	Dosierung Melaminharz: - 0,75 % K ₂ SO ₄ - 0,10 % CL90 - 0,10 % Seignettensalz - 0,10 % Melaminharz	B - D -	0,47	B (B-) 0,47 10 Mela B (D-) 0,47 10 Mela

Messreihe 2

Messreihe 3

gilt für die Hauptuntersuchungen der Längenänderungsmessung & Festigkeitsuntersuchungen der **Messreihen 2 + 3**

Anhang 2 – Ergebnisse Untersuchungen der Sande

Alle Ergebnisse des Anhang 2 entstammen der vorangegangenen wissenschaftlichen Kollegarbeit [24].

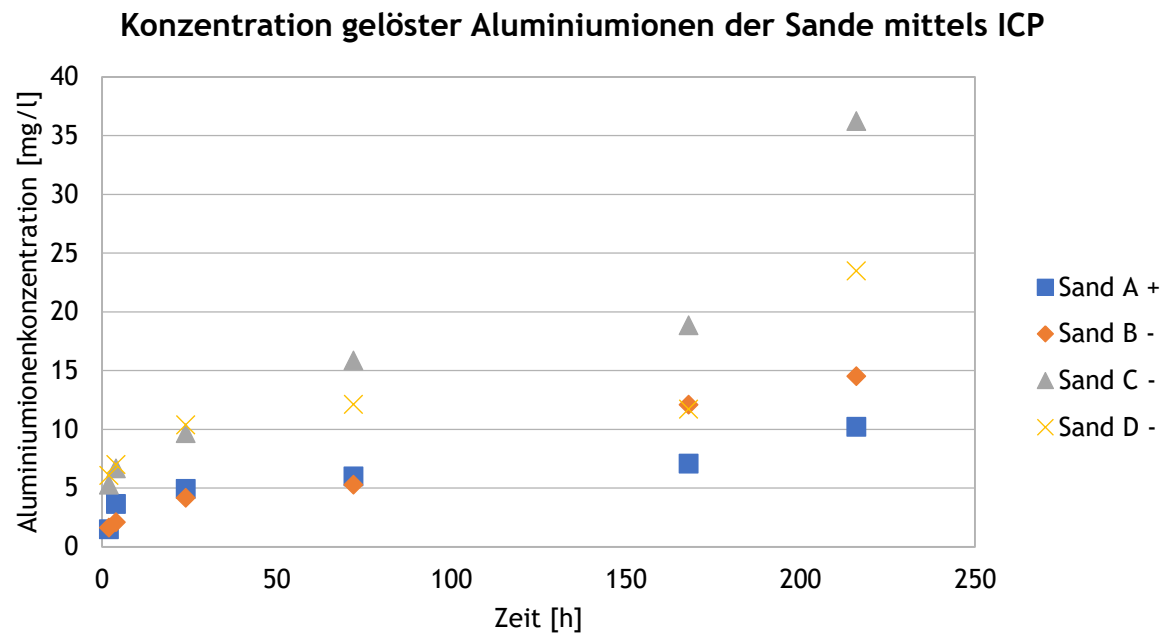


Abbildung 42: Konzentration der gelösten Aluminiumionen der Sande mittels ICP

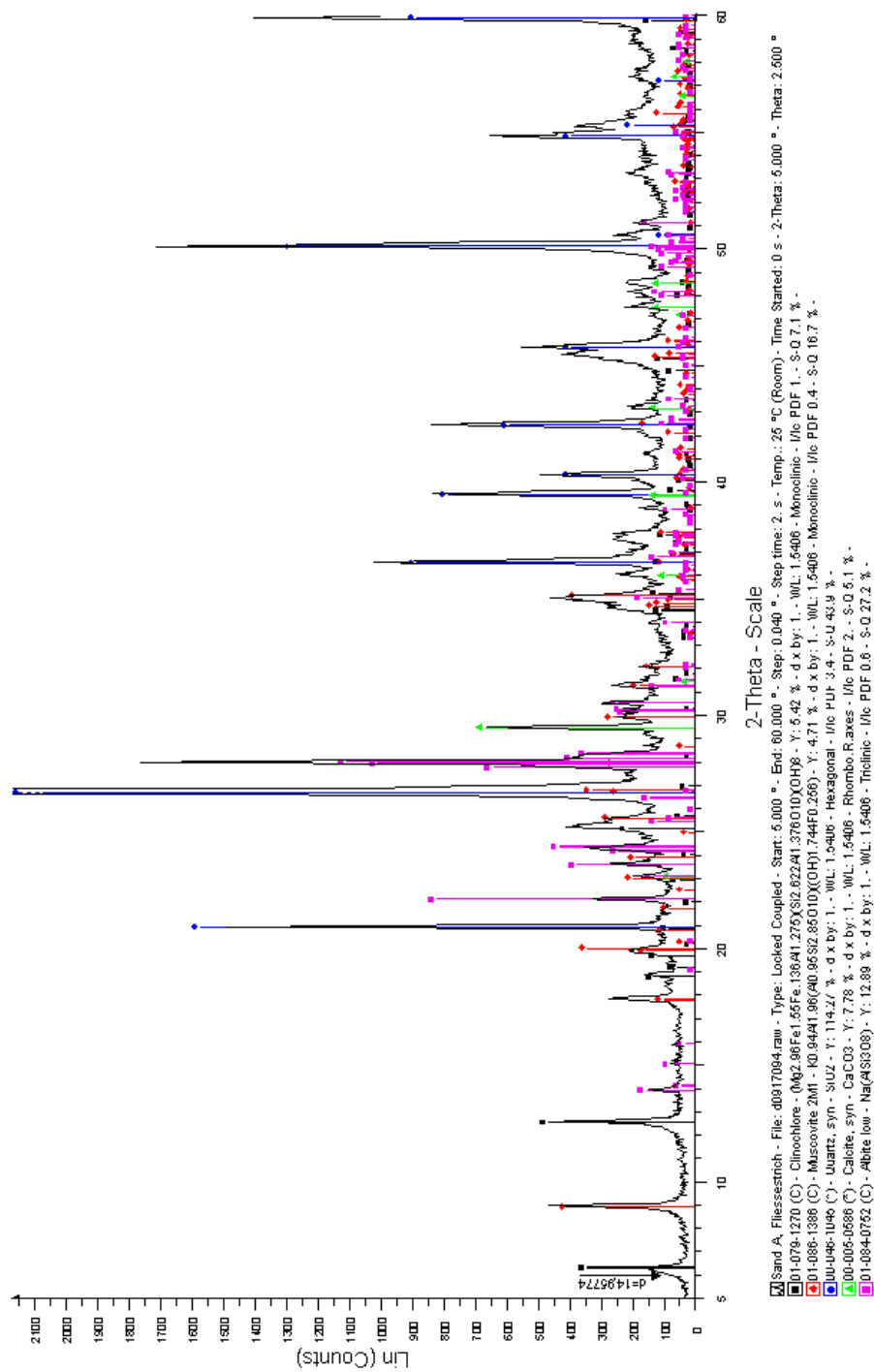


Abbildung 43: qualitatives XRD Ergebnis der GK B - (Partikelgröße < 63 µm)

Legende:

- Klnochlor
- Calcit
- Muscovit
- Albit
- Quarz

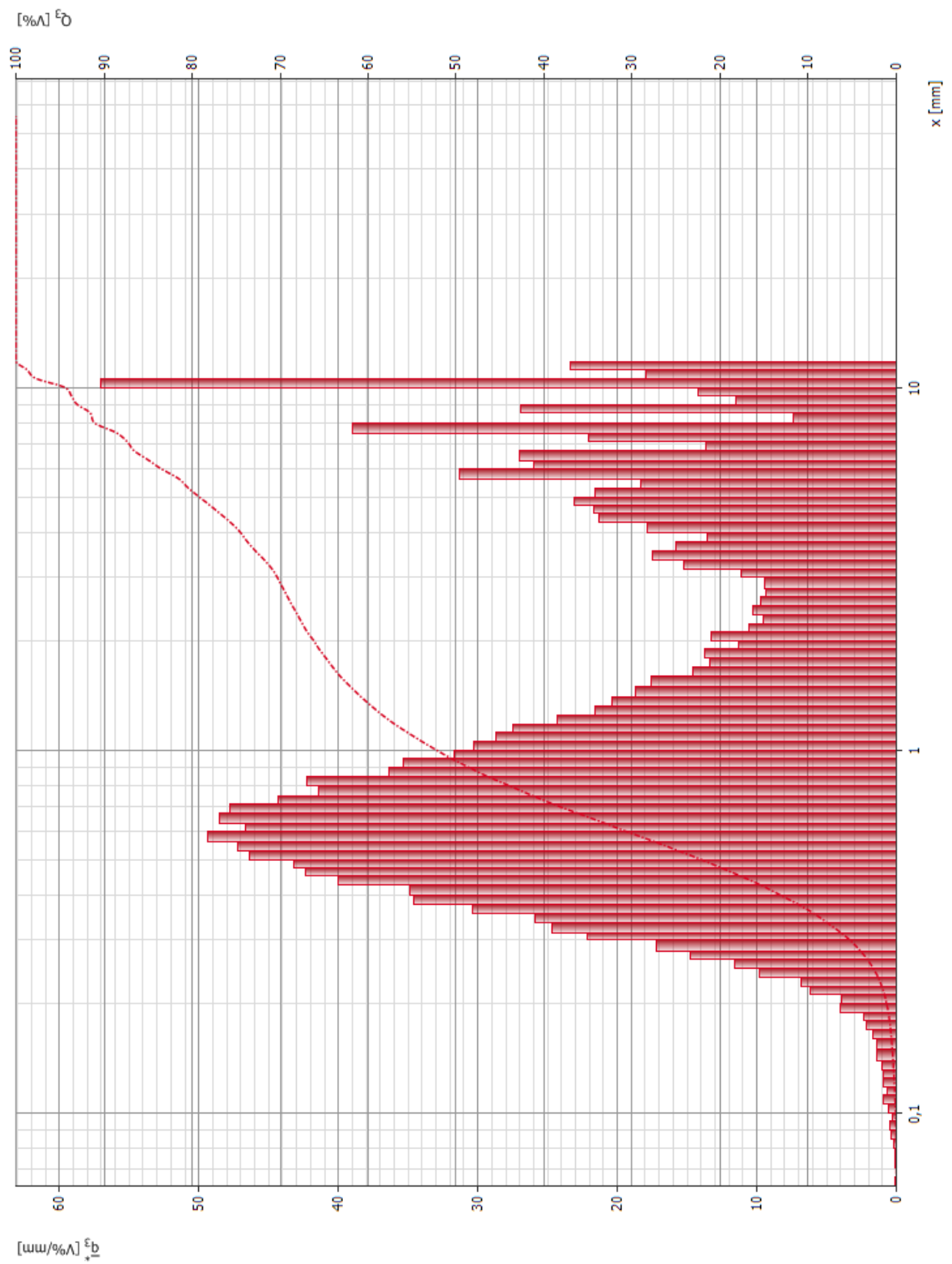


Abbildung 44: Korngrößenverteilung GK A +

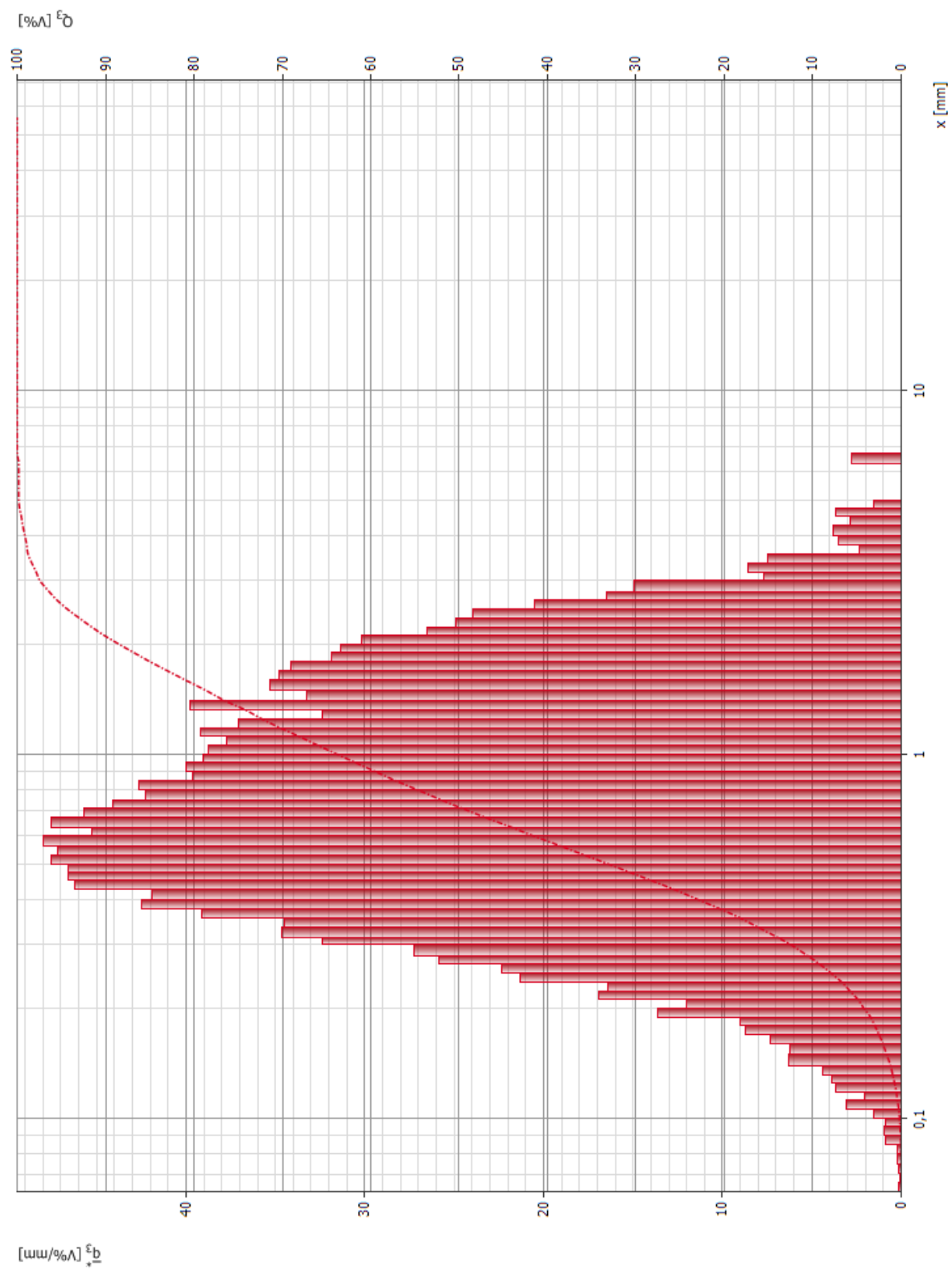


Abbildung 45: Korngrößenverteilung GK B -

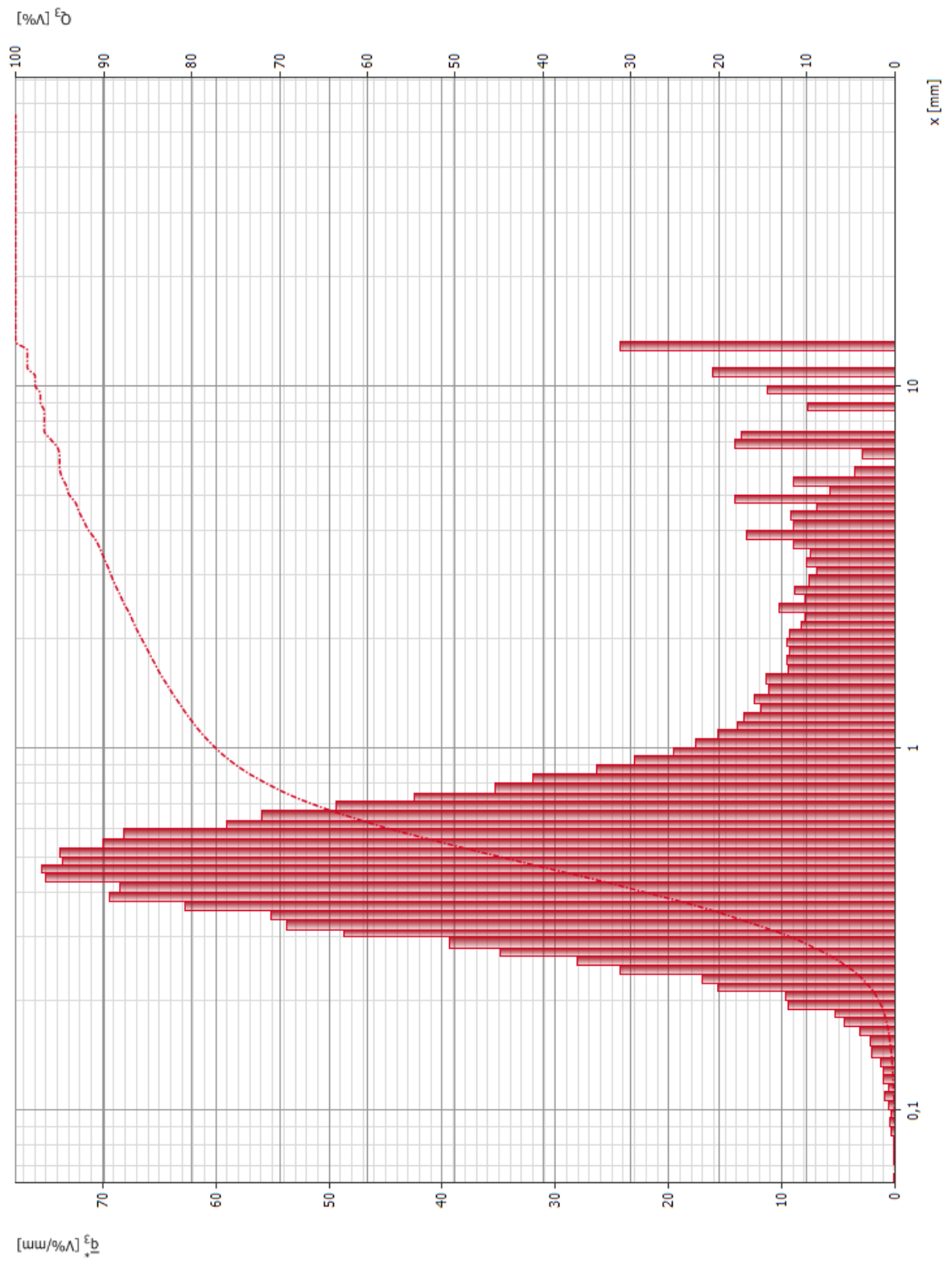


Abbildung 46: Korngrößenverteilung GK D -